



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

**ANALÝZA VLIVU UMÍSTĚNÍ USMĚRŇOVAČE V
NADZVUKOVÉM PROUDU V KOMOŘE
DIFERENCIÁLNÍHO ČERPÁNÍ**

ANALYSIS OF THE IMPACT OF THE BAFFLE PLACEMENT IN THE SUPERSONIC FLOW IN THE
DIFFERENTIALLY PUMPED CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martina Vlasáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Studentka: Martina Vlasáková

ID: 177553

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vlivu umístění usměrňovače v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte 3D objemový model komory diferenciálního čerpání podle vzoru z publikace Dr. Danilatoše s usměrňovačem. Následně vyhodnoťte další varianty umístění usměrňovače s ohledem na vliv nadzvukového proudění při různých tlacích pomocí metody konečných objemů v systému Ansys Fluent. Proveďte analýzu možnosti praktického využití s ohledem na složitost výroby.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 31. 5. 2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá oblastí komory diferenciálního čerpání environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu, umístěním tlak omezujících clon a vlivem přepážky uvnitř komory.

V teoretické části je nejprve popsána Mikroskopie jako věda, informace o mikroskopech (rozdělení mikroskopů) a elektronech. Poté se práce zabývá přímo environmentální rastrovací elektronovou mikroskopií a její problematikou a vakuovým systémem. Dále jsou rozebrány programy pro výpočet daných problémů a jejich princip, simulace, matematické modely a výpočtové oblasti, základní informace o srovnávací studii, ze které práce vychází.

V experimentální části jsou uvedeny cíle práce a kapitola věnující se zpracování výsledků, které jsou srovnávány s výchozí studií za použití programu Ansys Fluent.

Klíčová slova

Komora diferenciálního čerpání, Environmentální rastrovací elektronový mikroskop, Ansys Fluent, Solid Works.

Abstract

This thesis deals with the area of the differential pumping chamber of an environmental scanning electron microscope, engaging the pressure limiting apertures and the influence of the enclosure inside the chamber.

In the theoretical part, it is first called Microscopy as science, information about microscopes (division of microscopes) and electrons. Afterwards, the theory deals directly with environmental scanning electron microscopy and its problems and vacuum system, mathematical models and computational areas, basic information about the comparative study from, which the thesis is based.

In the experimental part there are presented the objectives of the work and the chapter dealing with the processing of results, which are compared with the initial study using the program Ansys Fluent.

Key words

Differentially pumped chamber, Environmental scanning electron microscope, Ansys Fluent, Solid Works.

VLASÁKOVÁ, M. *Analýza vlivu umístění usměřovače v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Analýza vlivu umístění usměrňovače v nadzvukovém proudu v komoře diferenciálního čerpání“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Jiřímu Maxovi Ph.D. za vynikající spolupráci, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

V Brně dne 31. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	7
1 Elektronová mikroskopie.....	8
1.1 Transmisní elektronová mikroskopie.....	9
1.2 Rastrovací elektronový mikroskop.....	9
1.3 Charakteristické vlastnosti elektronového mikroskopu.....	10
1.4 Zdroje elektronového svazku.....	10
1.5 Mechanismy rozptylu elektronů.....	11
1.6 Signály vznikající při interakci primárního svazku se vzorkem.....	11
1.6.1 Sekundární elektrony.....	12
1.6.2 Zpětně odražené elektrony.....	13
1.6.3 Charakteristické rentgenové záření.....	13
1.6.4 Augerovy elektrony.....	13
2 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop.....	14
2.1 Vakuový systém ESEM.....	15
2.1.1 Rotační vývěva.....	15
2.1.2 Difúzní vývěva.....	16
2.1.3 Turbomolekulární vývěva.....	17
3 Systémy použité při řešení problému.....	18
3.1 SolidWorks.....	18
3.2 Ansys Fluent.....	18
4 Základní rovnice pohybu tekutin.....	20
4.1 Rovnice kontinuity.....	20
4.2 Navierova-Stokesova rovnice.....	21
4.3 Rovnice energie.....	21
5 Výpočetní dynamika tekutin.....	22
5.1 Diskretizace.....	22
5.2 Metoda konečných objemů.....	22
6 Turbulence.....	24
6.1 Matematické modely turbulence.....	25
7 Srovnávací studie Danilatos.....	26
7.1 Principy studie PLA.....	26
7.2 Geometrie PLA2.....	26
7.3 Diferenciální čerpání s pomocí ejektoru	27
8 Cíle práce.....	28
9 Zpracování výsledků.....	29
9.1 Srovnávací výpočet.....	29
9.2 Vyhodnocované varianty.....	35
9.2.1 Varianta A – přepážka bez posunutí s větším průměrem.....	35
9.2.2 Varianta B – posunutá přepážka, původní průměr.....	35
9.2.3 Varianta C – posunutá přepážka, větší průměr	36
9.3 Vyhodnocení jednotlivých variant	37
Závěr	40
Seznam použité literatury.....	41
Seznam použitých zkratk	44
Seznam příloh.....	45

Úvod

Bakalářská práce vychází ze studie doktora G. D. Danilata, která se zabývá diferenciálním čerpacím systémem s rychlouzávěrem se zaměřením na nové postupy návrhu pro ESEM. Tato studie je v práci využita pro oblast přepážky situované v komoře diferenciálního čerpání ESEM a jejím vlivem na povahu proudění.

První kapitola se nejprve zabývá vznikem Mikroskopie jako vědní disciplíny, všeobecně mikroskopy a poté se zaměřuje na mikroskopy elektronové. V podkapitolách je uvedeno základní rozdělení mikroskopů (transmisní, rastrovací, elektronové), zdroje elektronů, mechanismy rozptylu elektronů a signály, které vznikají.

Jelikož se práce zabývá komorou diferenciálního čerpání, je druhá kapitola zaměřena na Environmentální rastrovací elektronový mikroskop, ve kterém je komora umístěna. Po základních informacích o ESEM je kapitola členěna do podkapitol, kde jsou rozděleny nejdůležitější části, které se tohoto mikroskopu týkají. Jedná se o vakuový systém včetně schématu vakuové soustavy a jejími jednotlivými součástmi (rotační, difúzní a turbomolekulární vývěva).

Ve třetí kapitole jsou základní informace týkající se systémů použitých při řešení problému. Jedná se o počítačové programy, které napomáhají při analýze a simulaci jednotlivých vlivů na charakter proudění.

Protože software při řešení využívá rovnice pohybu tekutin, je na ně zaměřena i následující kapitola. Nejprve jsou zmíněny všeobecné informace o rovnicích pohybu a poté je zaměřeno na rovnice kontinuity, Navier-Stokesovy rovnice a na rovnice energie.

Další kapitoly se věnují výpočetní dynamice tekutin, rozdělením modelu tělesa na jednotlivé oblasti, základní tvary sítí, náhodným pohybům částic (lamínární a turbulentní proudění) a matematickým modelům turbulencí.

Jelikož práce vychází ze srovnávací studie doktora Danilata, je jemu i jeho studii věnována další kapitola, ve které jsou uvedeny základní informace o tlak omezujících otvorech (PLA1 a PLA2) a principu diferenciálního čerpání pomocí ejektoru.

Poté jsou uvedeny základní cíle práce, které byly stanoveny, zejména vliv změny vzdálenosti a délky přepážky.

Experimentální část práce je uvedena v kapitole Zpracování výsledků. Výsledky jsou porovnávány s výsledky výchozí studie za použití programu Ansys Fluent, ve kterém jsou vytvořeny simulace proudění.

S výchozí studií jsou porovnávány tři varianty vzdáleností a délek přepážky pomocí proudění hustot, tlaků, rychlostí a teplot (s grafickým znázorněním). Průměrné hodnoty jednotlivých variant jsou vyneseny do sloupcových grafů, aby byly jednotlivé varianty spolu srovnatelné.

1 Elektronová mikroskopie

Pojmenování vědní disciplíny „Mikroskopie“ vzniklo ze spojení dvou řeckých slov „mikros“ (malý) a „skopeo“ (pozorovat). Mikroskopie je souhrnný název pro velké množství metod používaných při práci s mikroskopem a zahrnuje mnoho úkonů, jako například přípravu vzorku, obsluhu mikroskopu, pozorování vzorku, zpracování a vyhodnocení získaných dat z pozorování [1], [2], [3].

Mikroskop je přístroj sloužící k pozorování zvětšeného modelu vzorku tak, aby bylo možné pozorovat požadované struktury, které nejsou viditelné lidským okem (a v co nejvyšší kvalitě). Pro potřeby jemných pohybů manipulace s mikroskopem byly zavedeny tzv. mikromanipulátory – mechanická zařízení, která usnadnila práci lidské ruky. První mikroskop byl sestaven kolem roku 1590 v Nizozemsku [3].

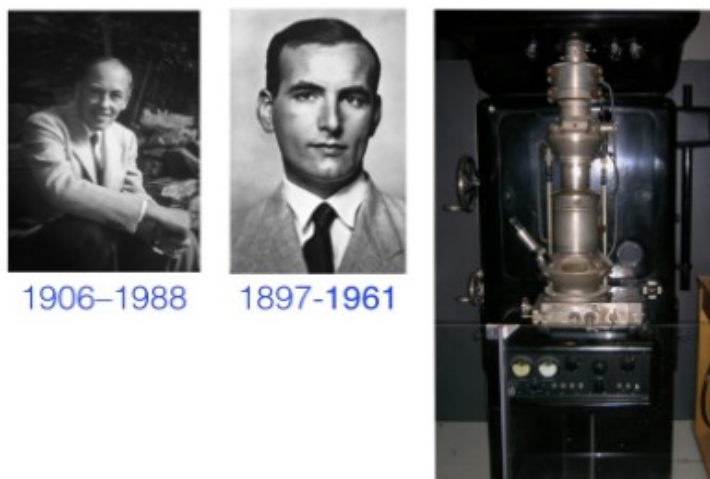
Mikroskopy se dělí podle způsobu, jakým zobrazují předmět, do dvou základních skupin na optické a elektronové.

Optické mikroskopy využívají soustavu čoček (objektiv a okulár) a viditelné světelné záření, které zároveň omezuje rozlišení mikroskopu díky vlnové délce použitého světla. Pozorovaný objekt je možné zvětšit asi 1000 x, velkou výhodou je snadná obsluha i údržba [2], [4].

Elektronové mikroskopy na rozdíl od optických využívají svazek elektronů (ve vakuu), jehož výhodou je záření velmi malé vlnové délky (asi 100 000 x), oproti světlu používanému u optického mikroskopu [1], [4].

První elektronový mikroskop (uveden na Obr. 1) byl zkonstruován roku 1931, jeho autory byli M. Knoll a E. Ruska [5].

Ruska-Knoll Microscope



Obr. 1.: První elektronový mikroskop a jeho autoři [9].

1.1 Transmisní elektronová mikroskopie

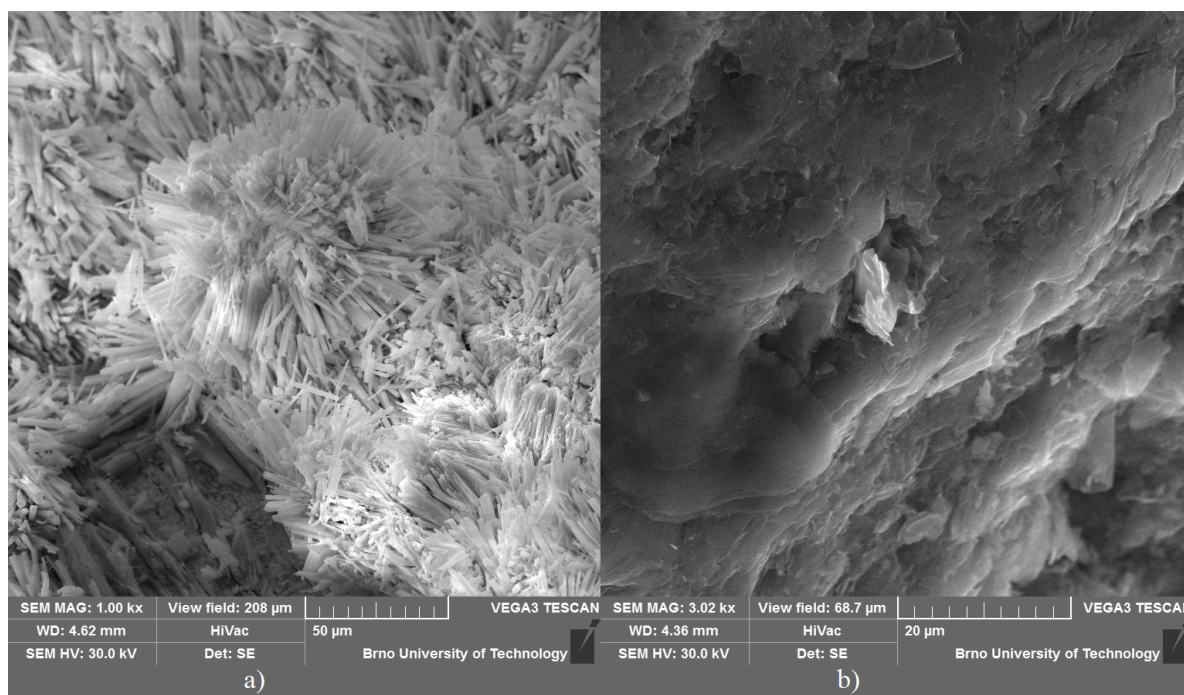
Transmisní elektronový mikroskop (TEM) využívá ke zvětšení obrazu vzorku svazek primárních elektronů (zdrojem elektronů žhavené wolframové vlákno) a vakuum. Výhodou TEM je tisícinásobné až stotisícinásobné zvětšení, avšak je potřeba zohledňovat tloušťku a odolnost vzorku. Tloušťka může být 0,1 až 5 μm (v závislosti na materiálu a energii elektronů). Odolností se rozumí schopnost vzorku snést působení vakua a elektronů [2], [4].

Princip fungování TEM je obdobný jako u optického mikroskopu. Svazek urychlených elektronů je formován kondenzorovou čočkou (čočkami) na pozorovaný vzorek a po dopadu na fluorescenční stínítko mikroskopu je obraz viditelný okem. V případě potřeby je možné využít kameru pro vytvoření snímku zvětšené struktury [5].

1.2 Rastrovací elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM, z anglického Scanning Electron Microscope) je využíván zejména ke sledování struktur pevných látek. Výhodou SEM je až stotisícinásobné zvětšení, rozlišovací schopnost až 15 nm a hloubka ostrosti až několik mm, nevýhodou je nutnost vakua. Ukázka použití SEM v praxi je uvedena na Obr. 2 [2], [4].

Při zkoumání pomocí SEM dopadá na povrch vzorku tenký svazek elektronů, který se díky vychylovací soustavě postupně posouvá na všechna místa vzorku. Následkem dopadu svazku elektronů s vysokou energií vznikají odražené, popř. emitované, elektrony z povrchu vzorku, které jsou využívány pro zobrazení požadované struktury na televizní obrazovce (monitoru) [4].



Obr. 2.: Ukázka zobrazení předmětů pomocí SEM z měření autorky v laboratoři předmětu Diagnostika a zkušebnictví FEKT VUT v Brně: a) koroze měděné destičky, b) hrana tuhy.

1.3 Charakteristické vlastnosti elektronového mikroskopu

K charakteristickým vlastnostem mikroskopů patří zejména [3]:

- celkové zvětšení mikroskopu,
- rozlišovací schopnost,
- hloubková ostrost.

Tyto vlastnosti závisí na množství paprsků zachytilné objektivem v závislosti na indexu lomu prostředí mezi čočkou objektivu a pozorovaným objektem [3].

Celkové zvětšení mikroskopu se skládá ze součinu vlastního zvětšení okuláru a objektivu. Rozlišovací schopnost (neboli rozlišení) udává nejmenší možnou vzdálenost dvou bodů sledovaného objektu tak, že jsou tyto dva body od sebe zřetelně rozlišitelné. Hloubková ostrost udává schopnost mikroskopu zobrazit ostře všechny body předmětu v zorném poli tak, aby zůstala zachována jejich ostrost, bez ohledu na jejich výškové umístění na předmětu (výstupky, pukliny) [3].

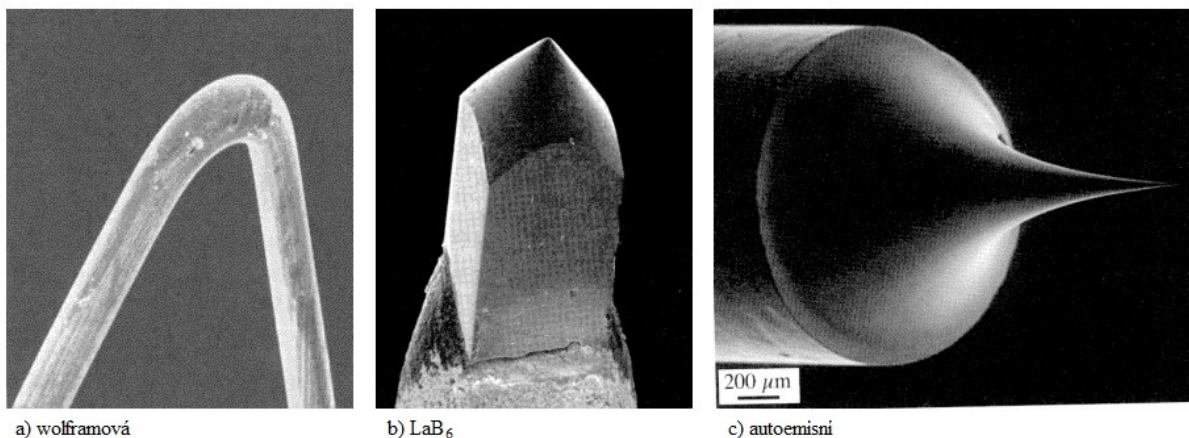
1.4 Zdroje elektronového svazku

V elektronových mikroskopech se jako zdroj elektronů používá tzv. elektronová tryska. Pro emisi (uvolnění) elektronů vázaných v atomu se využívají nejčastěji dva způsoby – termoemisní a autoemisní zdroje [7].

Termoemisní zdroj je nejpoužívanější a rozdělujeme jej na přímo a nepřímo žhavený. Přímo žhaveným zdrojem je wolframové vlákno (wolfram se používá kvůli nízké výstupní energii valenčních elektronů a pro jeho provoz není potřeba vysoká hodnota vakua). Elektrony získají energii pro uvolnění z napětí přiloženého na vlákno, případně je možné usnadnit uvolnění vytvarováním katody do písmene V. Pro nepřímo žhavené zdroje je využívána tyčinka hexaborid lanthanu (LaB_6), který má větší emisi elektronů, než wolframová katoda, ale vyžaduje také vyšší hodnotu vakua [2], [7].

Autoemisní zdroj se používá v nejvýkonnějších mikroskopech. Je složen z wolframové katody FEG (Field Emission Gun) a dvou anod, které využívají tzv. tunelového jevu. Pro vznik jevu je potřeba vysoké intenzity elektrického pole, aby elektron uvolněný z katody získal dostatečnou energii pro překonání potenciálové bariéry. První z anod slouží k vytvoření zmíněné intenzity, druhá anoda urychluje elektrony emitované z katody [2], [7], [8].

Všechny tři výše zmíněné katody elektronových mikroskopů jsou uvedeny na Obr. 3.



Obr. 3.: Katody elektronových mikroskopů [7].

1.5 Mechanismy rozptylu elektronů

Rozptyl elektronů je následkem srážek svazku urychlených elektronů s jádry atomů a elektrony pozorovaného předmětu. Tyto srážky rozdělujeme na pružné a nepružné rozptyly [3].

K pružnému rozptylu dochází v elektromagnetickém poli jader atomů, kdy se změní pouze směr pohybu elektronu ve vzorku, avšak jeho kinetická energie zůstává beze změny. Následkem pružného rozptylu je postupné rozšiřování svazku elektronů [2], [3].

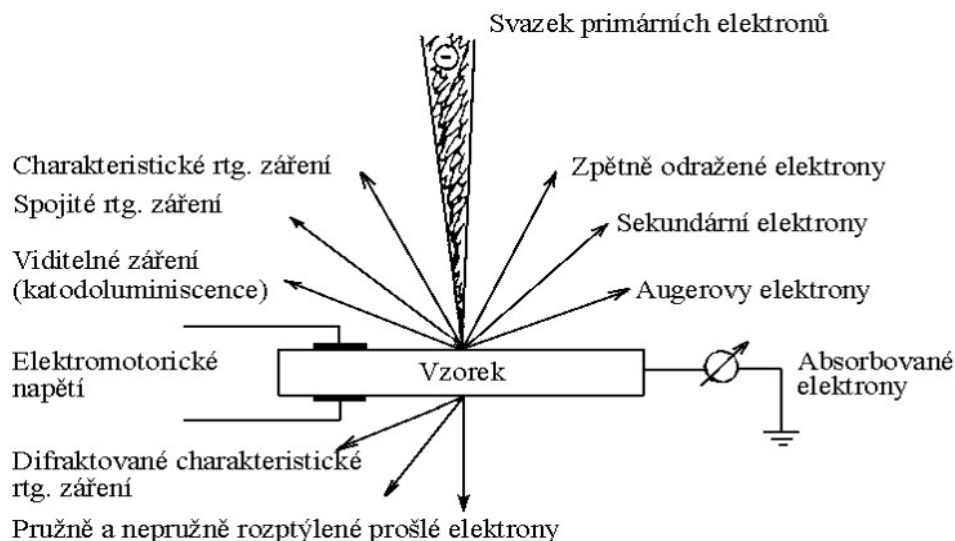
Naopak u nepružného rozptylu dochází ke změně kinetické energie, která se přenesla na atom vzorku. Svazek elektronů se zpomaluje a předává část své energie elektronům vzorku, které buď přejdou na vyšší energetickou hladinu, nebo atom úplně opustí – tzv. sekundární elektrony (viz kapitola 1.6) [2], [3].

Nepružné rozptyly se rozdělují do tří částí:

- procesy generující rentgenové záření,
- procesy generující sekundární elektrony a
- procesy vyplývající z kolektivních interakcí s mnoha atomy [7].

1.6 Signály vznikající při interakci primárního svazku se vzorkem

Při dopadu svazku primárních elektronů na povrch pevné látky vznikají signály, které jsou znázorněny na Obr. 4. V této práci se dále budeme zabývat zejména Sekundárními elektrony, Zpětně odraženými elektrony, Charakteristickým rentgenovým zářením a Augerovými elektrony [3].

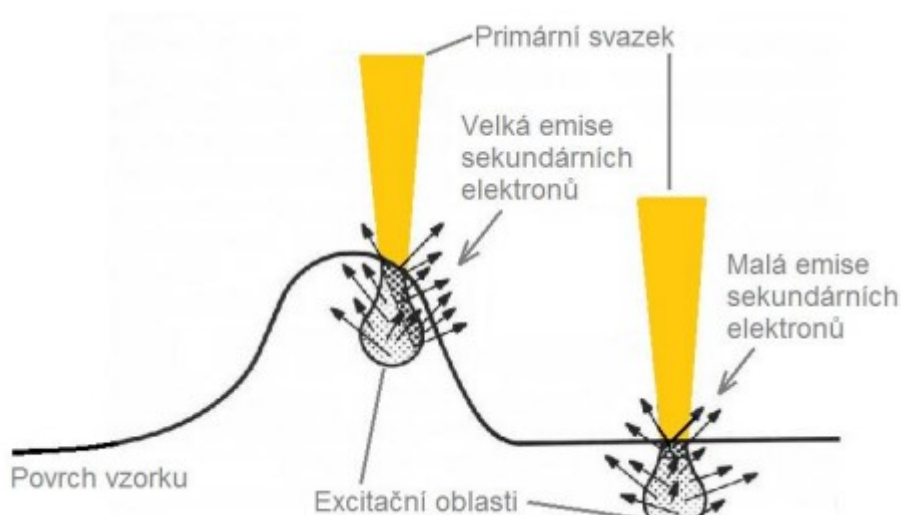


Obr. 4.: Signály vznikající při dopadu elektronového svazku na povrch pevné látky [3].

1.6.1 Sekundární elektrony

Jako sekundární elektrony (SE) jsou označovány ty, které opouštějí povrch pevné látky s energií menší, než 50 eV, zpravidla 3 až 5 eV. Díky malé kinetické energii SE jsou ze vzorku emitovány pouze ty SE, které jsou v malé hloubce pod povrchem vzorku. Ostatní SE jsou vzorkem absorbovány, jelikož nemají dostatečnou kinetickou energii pro opuštění vzorku [2], [6].

Díky emitovaným SE získáme informace o chemickém složení vzorku i o jeho povrchu jelikož na vyvýšených místech vzorku je emise SE větší, než na propadlinách – znázorněno na Obr. 5. [2], [6].



Obr. 5.: Emise sekundárních elektronů u povrchu vzorku [2].

1.6.2 Zpětně odražené elektrony

Zpětně odražené elektrony (BSE) jsou primární elektrony, které se vychýlily zpět k povrchu vzorku a zbyla jim dostatečně velká kinetická energie pro emisi. BSE mají při emisi ze vzorku obvykle 60-80 % původní energie (od 50 eV do energie primárního svazku). Množství emitovaných BSE závisí na urychlovacím napětí a atomovém čísle atomů vzorku, díky jejich vyšší kinetické energii jsou ze vzorku emitovány elektrony z hloubky až 1 μm [2], [6].

Pomocí BSE (stejně jako SE) je možné získat informace o chemickém složení vzorku, jelikož každý prvek z periodické soustavy má jiné atomové číslo a tím i podíl BSE (např. pro uhlík je BSE $\sim 6\%$, pro zlato je BSE $\sim 50\%$) [2], [6].

1.6.3 Charakteristické rentgenové záření

Rentgenové záření (RTG) vzniká jako následek nepružného rozptylu, při kterém se kinetická energie přenesla na atom vzorku (na jeho jádro i obal) [3].

Rozlišují se dva typy RTG záření, nazývané jako spojitě a charakteristické. Spojité záření vzniká při přenosu kinetické energie na jádro atomu a působí jako šum. Charakteristické záření vzniká při přenosu energie na obal atomu, kde dochází k ionizaci a přebytečná energie je z atomu uvolněna v podobě záření. Díky energiím elektronů, které jsou na hladinách elektronového obalu specifické pro každý prvek, je charakteristické záření využíváno pro analýzu prvků [2], [3].

1.6.4 Augerovy elektrony

Augerovy elektrony (AE) vznikají (stejně jako RTG záření) při nepružných rozptylech, kdy dochází k ionizaci atomu látky a přebytečná energie je z atomu uvolněna emisí AE (bez vzniku záření). AE (jindy nazýváno jako Augerův jev) jsou využívány pro rozbor povrchů pevných látek [2], [3].

2 Environmentální rastrovací elektronový mikroskop

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.2, rastrovací elektronové mikroskopy (SEM) jsou využívány zejména ke sledování struktur pevných látek při až stotisícinásobném zvětšení, nevýhodou SEM je nutnost vakua. Na povrch vzorku dopadá tenký svazek elektronů, který se postupně posouvá po vzorku [2], [4].

Z důvodu podmínky dodržení vysokého vakua je nutné, aby vzorek neobsahoval těkavé látky a zdroj elektronů – proto není možné SEM používat pro studium například biologických vzorků, nejrůznějších pěn, emulzí, roztoků a podobně, aniž by byl vzorek předem upraven (dehydratován, či chemicky zafixován). Tento postup není možné použít u všech typů vzorků, jelikož je díky úpravě změněna struktura [2], [10].

Při pozorování elektricky nevodivých vzorků se na jejich povrchu kumuluje záporný náboj, který deformuje elektrická pole v okolí a tím se snižuje kvalita zobrazených snímků, z tohoto důvodu je potřeba, aby byl materiál buď elektricky vodivý a nebo aby byl povrchově upraven vrstvou kovu na elektricky vodivý (používají se zlato, platina, palladium, chrom a další) [2], [10].

Environmentální¹ rastrovací elektronový mikroskop (ESEM, z anglického Environmental Scanning Electron Microscope) vychází ze SEM, avšak jeho vakuové prostředí je odděleno od komory vzorku komorou diferenciálního čerpání a je tak možné zkoumat vzorky bez povrchových úprav vrstvou kovu [1], [2], [10].

Díky komoře diferenciálního čerpání plynu spolu se systémem clon omezujících tlak je rozdílný tlak mezi komorou vzorku (až 4000 Pa) a prostorem zdroje elektronů ($10^{-3} - 10^{-9}$ Pa, dle typu katody) možné udržet [1], [2].

S vysokým tlakem v komoře vzorku je také větší rozptyl primárních elektronů, jeho velikost je závislá na tlaku v komoře, pracovní vzdálenosti a urychlovacím napětí. Při vysokém tlaku se primární elektrony mohou rozptýlit úplně (zatímco u vysokého vakua k vychýlení téměř nedochází), naopak při určité hodnotě tlaku se dostatečná část elektronů drží ve svazku a zbylá část elektronů dopadá do okolí místa dopadu svazku. Dopad rozptýlených elektronů do okolních míst způsobuje šum, který sice kvalitu získaného signálu ovlivní, avšak stále lze získat velmi kvalitní snímky ve vysokém rozlišení [2], [10].

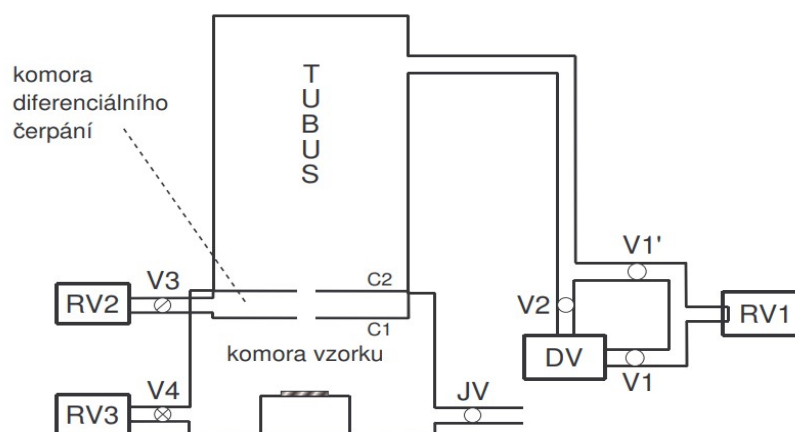
¹ Environmentální, Environmental – týkající se životního prostředí, ekologický.

2.1 Vakuový systém ESEM

Hlavním požadavkem na vakuovou soustavu ESEM je schopnost udržet rozdílné tlaky plynů v jednotlivých částech mikroskopu (mezi komorou vzorku a prostorem zdroje elektronů). K udržení rozdílných tlaků slouží systém clon omezujících tlak a komora diferenciálního čerpání plynu, které jsou umístěny mezi tubusem mikroskopu a komorou, ve které je umístěn vzorek (viz Obr. 6) [2], [11].

Primární elektrony musejí od svého zdroje překonat rozdílné tlaky tak, aby se jejich dostatečná část udržela ve svazku a dostala se až k povrchu vzorku. Z tohoto důvodu se používají clony (na Obr. 6 jako C1 a C2), které obsahují malé otvory (s průměrem 10 až 100 μm), omezující proudění plynů mezi komorami a zároveň tvoří jakýsi „průchod“ pro primární elektrony [2], [11].

Požadovaný tlak se získává pomocí jehlového ventilu (JV), který zajišťuje připouštění plynu do komory vzorku (nejčastěji bývá používán dusík nebo vodní pára) až do doby, než dojde k ustálení rovnováhy mezi připouštěným plynem a rotační vývěvou umístěnou v komoře diferenciálního čerpání [2], [11].



Obr. 6.: Zjednodušené schéma vakuové soustavy ESEM. RV1, RV2, RV3 - rotační vývěvy; DV - difúzní vývěva; V1, V1', V2, V3, V4 - vakuové ventily; JV - jehlový ventil; C1, C2 - tlak omezující clony [11].

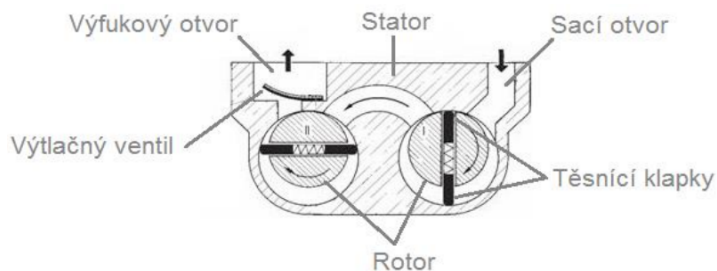
2.1.1 Rotační vývěva

Rotační vývěvy (RV) jsou používány pro vytváření vakua tak, že nasávají plyn z prostoru, ze kterého čerpají (například u Obr. 6 čerpá rotační vývěva RV3 plyn z komory vzorku), uvnitř vývěvy se postupně zvyšuje tlak a jakmile je větší, než v prostoru výfuku, otevře se výfukový ventil a plyn je přetlačen do výfuku [2], [11], [12].

U ESEM se používá rotační olejová vývěva (ROV), která je vhodná pro čerpání plynů od 1 do 10 Pa. Olej zde slouží jako mazivo, těsnění mezer a napomáhá k lepšímu odvodu tepla, které ve vývěvě vzniká. ROV vynikají rychlostí čerpání plynu a svojí spolehlivostí, naopak nevýhodou je znečištění vakuového systému olejem. Řez dvoustupňovou rotační

olejovou vývěvou je uveden na Obr. 7 (dvoustupňové a vícestupňové vývěvy se používají kvůli vyšší účinnosti čerpání) [2], [12].

Kromě ROV existují také další typy rotačních vývěv, například Rootsova vývěva (používá se při požadavku velmi čistého vakua), Molekulární a Turbomolekulární vývěva (používají se pro čerpání plynu jako jednotlivých molekul) [2], [12].

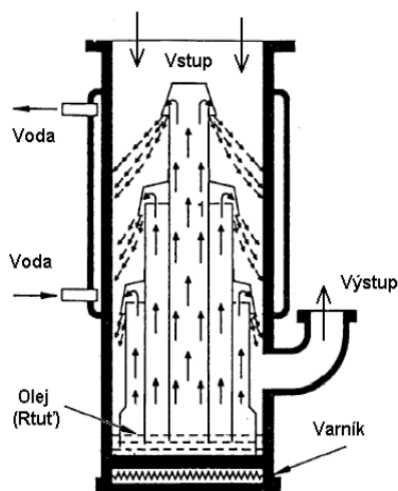


Obr. 7.: Řez dvoustupňové rotační olejové vývěvy [2].

2.1.2 Difúzní vývěva

Difúzní vývěva (DV) se používá zároveň s RV (nejčastěji ROV), jelikož pro její funkci je nutné nejdříve vytvořit předvakuum (k vytvoření předvakua u ESEM slouží právě ROV) a poté už je schopna vytvořit velmi vysoké vakuum [2], [12].

Jednotlivé části DV jsou uvedeny na Obr. 8. Varník je pomocí elektrického proudu ohříván a způsobuje odpařování pracovní kapaliny (dříve se používala rtuť, v dnešní době je využíván minerální, případně silikonový olej), páry oleje proudí směrem ke vstupu (sání) a poté do komory. Čerpaný plyn se prolíná s párami oleje a dopadá na vnitřní stěny, které jsou ochlazovány vodou. Na stěně vývěvy kondenzují pouze páry plynu (zkapalňují se) a stékají zpět jako pracovní kapalina, zatímco plyn je odčerpán na výstup vývěvy [2], [12].



Obr. 8.: Řez difúzní vývěvou [12].

2.1.3 Turbomolekulární vývěva

Turbomolekulární vývěva se používá pro čerpání plynu jako jeho jednotlivé molekuly pomocí rychle rotujících lopatek rotoru. Velkou výhodou turbomolekulárních vývěv je jejich schopnost vytvořit čisté vakuum až do tlaku 10^{-11} Pa, naopak nevýhodou je nutnost před čerpání, nebo například opotřebovávání ložisek či vibrace [2].

3 Systémy použité při řešení problému

3.1 SolidWorks

SolidWorks je počítačový program, který byl vyvinut pro modelování objektů ve 3D rozměrech s použitím stolních počítačů – tzv. CAD technologie (z anglického Computer Aided Design, neboli počítačem podporované projektování) a zároveň s uživatelskou přívětivostí, aby byl program snadno ovladatelný a intuitivní [13].

Systém SolidWorks vlastní společnost Dassault Systèmes SolidWorks Corp. s centrálou ve Walthamu, Massachusetts, USA, která je světovým poskytovatelem řešení pro správu životního cyklu výrobků [13].

Kromě návrhu objektu ve 3D program umožňuje také jeho simulaci (například vibrace, nárazy, otáčení jednotlivými díly i celkem) ještě před uvedením konkrétního dílu (případně celku) do výroby a šetří tak mimo jiné i náklady [13].

SolidWorks je komplexní systém, který je nabízen formou balíčků a aplikací rozdělených podle jejich funkcí tak, aby si každý mohl vybrat, kterou část bude pro svoje návrhy potřebovat. Jedná se například o oblasti 3D modelování, sestavy a mechanismy, vytváření výkresů, ale i automatizace jednotlivých návrhů, porovnávání modelů, funkce pro import a export, simulace proudění, ekologické navrhování, kontrola vyrobitelnosti a mnohem více [14].

Velkou výhodou je také česká technická podpora a lokalizace všech nabízených produktů [14].

3.2 Ansys Fluent

Ansys Fluent je v současnosti nejvyužívanější celosvětový program pro výpočetní dynamiku kapalin (CFD, z anglického Computational Fluid Dynamics), který využívá fyzikální modely pro výpočet rychlých a přesných výsledků. Uplatnění programu je velmi široké v mnoha odvětvích, ať už v letectví (výpočet opotřebení jednotlivých částí letadel), automobilový průmysl, stavba přehrad, mostů, zvyšování přesnosti a spolehlivosti vědeckých nástrojů, zvyšování spolehlivosti u domácích spotřebičů a mnohem více [15].

Simulace proudění kapalin u konkrétních produktů umožňuje získat informace o tom, jak se daný produkt bude chovat při jeho používání – simulaci je možné využít ještě před zadáním daného produktu do výroby, případně později jako kontrolu již hotového výrobku, což značně snižuje náklady na výrobu, jelikož je možné případné nedostatky odhalit dříve, než je produkt fyzicky vyroben [15].

CFD je flexibilní nástroj vynikající svojí přesností a šířkou aplikace, který se nezaměřuje pouze na kvalitativní výsledky, ale také na kvantitativní předpovědi vzájemných vztahů včetně nabídky případných kompromisů [15].

K výpočtu proudění kapalin se používá platforma nazývaná Ansys Meshing, která fyzikální model pokryje sítí vhodnou pro konkrétní analýzu. Odborní uživatelé potom mohou vytvořenou síť ručně upravovat tak, aby vše bylo podle jejich požadavků a potřeb [15].

Kromě tohoto konkrétního nástroje společnost Ansys nabízí i spoustu dalších, například Ansys Maxwell (používaný pro návrh a analýzu elektromagnetických a elektromechanických zařízení), Ansys Discovery Live (slouží k 3D návrhům a simulaci designu a umožňuje měnit geometrii, materiály) a mnohem více [15].

4 Základní rovnice pohybu tekutin

Zkoumání pohybu reálných tekutin je velmi komplikované a ještě není zcela pochopeno, z tohoto důvodu se pro výpočty používá tzv. ideální tekutina, kterou je možné snadněji matematicky vyjádřit a zároveň poskytuje užitečné výsledky [16].

Ideální tekutina:

- má stabilní tok (rychlost proudění tekutiny se nemění s časem);
- je nestlačitelná (hustota tekutiny je konstantní);
- je neviskózní (viskozita je měřítkem roztékavosti tekutiny – resp. jak odolná je roztékání);
- je nevírová (např. po vložení zkušební tělesa do tekutiny se těleso bude pohybovat po směru proudu tekutiny a nebude se otáčet kolem vlastní osy) [16].

Mezi základní rovnice dynamiky tekutin a termodynamiky patří zákon zachování hmotnosti a hybnosti a zákon zachování energie [2].

4.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je vztah mezi rychlostí a průřezem pro tok tekutiny a formuluje ji zákon o zachování hmotnosti tekutin. Tekutina proudí elementárním objemem a její hmotnost musí být konstantní, z toho vyplývá, že změna hmotnosti je nulová [2], [16].

Rovnici kontinuity pro případ neměnného průřezu v čase pro případ prostorového proudění má tvar [2], [17]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad , \quad (1)$$

kde ρ je hustota kapaliny, ∇ je operátor nabla, \vec{u} vektor rychlosti kapaliny. Jelikož se veličiny nemění v čase, je při ustáleném proudění možné rovnici (1) zjednodušit. Změna hustoty kapaliny v čase je proto rovna nule, tekutina je nestlačitelná ($\rho = \text{konstantní}$) a rovnice (1) poté přechází do tvaru (3) [2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad , \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad . \quad (3)$$

4.2 Navierova-Stokesova rovnice

Navier-Stokesova rovnice (N-S rovnice) je formulována zákonem o zachování hybnosti a vychází z II. Newtonova pohybového zákona. N-S rovnice je jednou z nejdůležitějších rovnic pro pohyb tekutin a vyjadřuje se jako parciální diferenciální rovnice druhého řádu [17].

Zápis N-S rovnice [2]:

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}, \quad (4)$$

kde jsou z důvodu složitosti jednotlivé složky popsány samostatně [2], [17]:

1. $\frac{\partial u_i}{\partial t}$ je proměnnost proudového pole v čase,
2. $u_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$ je vnitřní setrvačné zrychlení (po přesunu do sousedního bodu prostoru, kde je jiná rychlost),
3. $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ je změna tlaku,
4. $\nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}$ je vliv viskozity (vazkosti).

4.3 Rovnice energie

Rovnice energie (také někdy Bernoulliho rovnice) je vyjádřením zákona zachování energie. Stejně jako u rovnice kontinuity musí být objem tekutiny na začátku i na konci stejný, jelikož tekutina je nestlačitelná a její hustota je konstantní. Pokud vzroste rychlost, kterou tekutina protéká, pak v místě změny rychlosti musí klesnout tlak (a naopak pokud klesne rychlost, v místě změny musí vzrůst tlak) [18].

Jeden z možných zápisů rovnice energie (5) [18]:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho \cdot g \cdot y_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho \cdot g \cdot y_2 + p_2, \quad (5)$$

kde ρ je hustota tekutiny, v_1 je rychlost tekutiny na vstupu, g je gravitační zrychlení, y_1 je výška na vstupu do trubice, p_1 je tlak na vstupu, v_2 je rychlost tekutiny na výstupu, y_2 je výška na výstupu z trubice a p_2 je tlak na výstupu.

Význam jednotlivých složek rovnice (5) [18]:

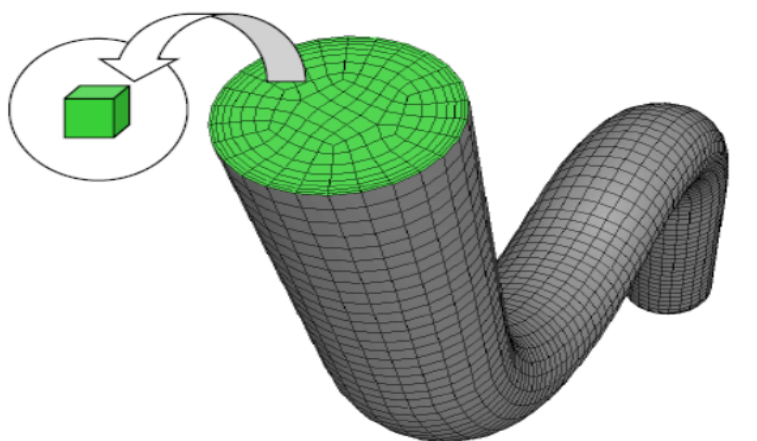
1. $\frac{1}{2} \rho v_1^2, \frac{1}{2} \rho v_2^2$ jsou kinetickou energii tekutiny jednotkového objemu,
2. $\rho \cdot g \cdot y_1, \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot y_2$ jsou potenciální energie tekutiny jednotkového objemu,
3. p_1, p_2 jsou tlakové potenciální energie tekutiny jednotkového objemu vzbuzené vnějšími silami.

5 Výpočetní dynamika tekutin

Výpočetní dynamika tekutin (CFD) je věda zabývající se prouděním kapalin, přenosem hmoty a tepla, chemickými reakcemi a hlavně řešením pomocí matematických výpočtů s využitím Diskretizace, Metody konečných objemů a Interpolačních schémat [19].

5.1 Diskretizace

Diskretizace rozděluje model tělesa na jednotlivé výpočetní oblasti pomocí sítě (názorně uvedeno na Obr. 9) na konečný počet prvků, případně objemů, pro usnadnění výpočtů. Hustota sítě (velikost jejích ok) je dána rychlostí změn zkoumaných veličin. Sít' je možné použít jak přímo na těleso (tj. počítat jeho vnitřní prvky a objemy), tak i na okolí tělesa (tj. zaměřuje se na vnější okolí) [12], [19].



Obr. 9.: Diskretizace na konečný počet objemů [2].

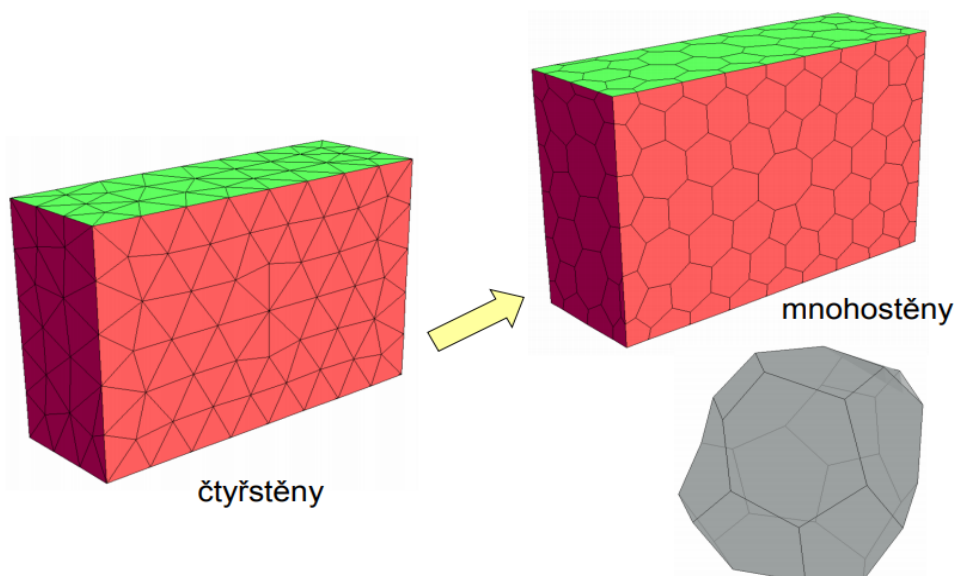
5.2 Metoda konečných objemů

Metoda konečných objemů (FVM, z anglického Finite Volume Method) se využívá při výpočtech proudících tekutin, případně přenosu tepla z jedné látky na druhou. Zkoumaná oblast je pomocí Diskretizace rozdělena na výpočetní sít' (buňky) konečných objemů, jejichž stěny slouží pro vlastní výpočty [2], [19].

Jednotlivé buňky sítě mohou mít různé tvary (ve 3D i 2D rozměrech), mezi základní patří [20]:

- čtyřstěn,
- jehlan,
- šestistěn,
- pětistěn,
- trojúhelník,
- čtyřúhelník.

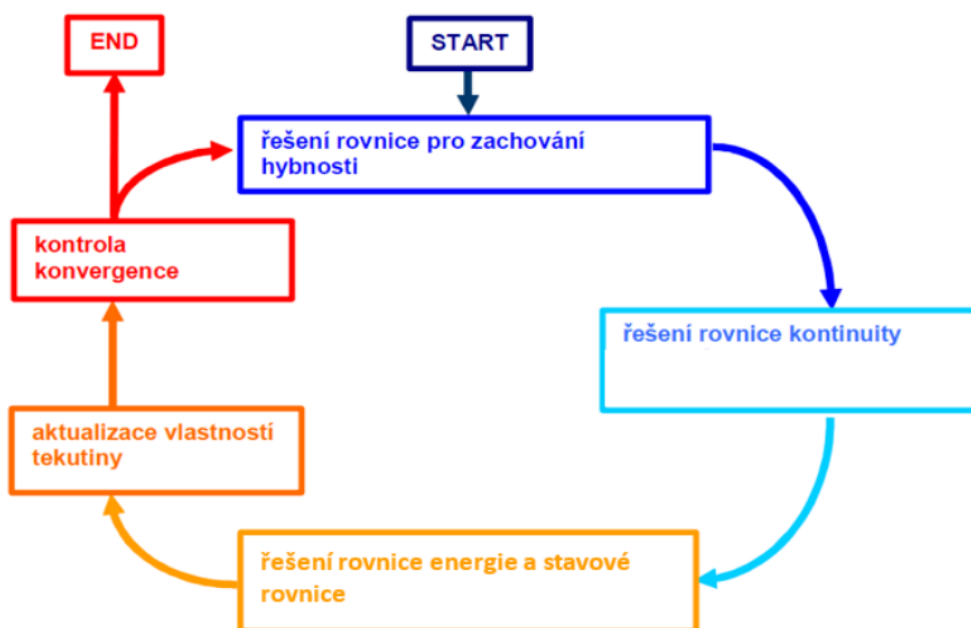
Ukázka výpočetní sítě metody konečných objemů s buňkami tvaru čtyřstěnů a mnohostěnů je uvedena na Obr. 10 [20].



Obr. 10.: Výpočetní síť metody konečných objemů [20].

Pro výpočty je důležité nastavení okrajových podmínek, které působí na jednotlivá oka sítě (buňky objemů) a tím i ovlivňují výsledky. Po nastavení okrajových podmínek probíhá série výpočtů, tzv. Iterační cyklus, který v sobě zahrnuje řešení jednotlivých rovnic (rovnice kontinuity, N-S rovnice, rovnice energie) a poté ověření konvergence. Cyklus probíhá pořád dokola až do okamžiku, kdy se ustálí zkoumané hodnoty. Schéma iteračního cyklu je uvedeno na Obr. 11 [2], [19].

Metodu konečných objemů využívá například program ANSYS Fluent (viz kap. 3.2).



Obr. 11.: Schéma iteračního cyklu [2].

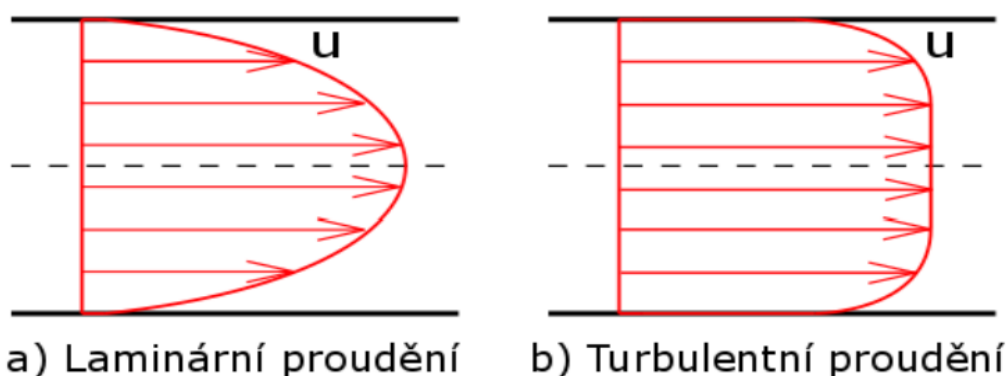
6 Turbulence

Turbulence je označení pro náhodný pohyb částic tekutiny, jejichž dráhy pohybu nejsou pravidelné a díky tomu dochází k promísení tekutiny a vyrovnávání rychlostí jednotlivých částí díky přeměně kinetické energie. Jelikož se jedná o náhodný pohyb částic, není možné vytvořit všeobecný model turbulence, ale je potřeba zvolit vhodný model pro danou situaci podle způsobu toku, požadovaných přesností, výpočetní techniky, která je k dispozici a také množství času, jelikož výpočet přesných simulací je časově náročný [2], [21].

Turbulentní proudění je složeno ze skupiny různě velkých turbulentních vírů. Velké víry se krok za krokem rozpadají na menší až do doby, kdy se nejmenší z nich rozptýlí v teplo [21].

Rozdělení proudění tekutin [2]:

- laminární proudění,
- turbulentní proudění.



Obr. 12.: Rychlostní profily pro proudění v potrubí [2].

Laminární proudění (uvedeno na Obr. 12 a) je charakteristické malou kinetickou energií nebo vysokou viskozitou. Částice laminárního proudění se pohybují uspořádaně ve vrstvách. Naopak turbulentní proudění (uvedeno na Obr. 12 b) má vysokou kinetickou energii nebo malou viskozitu. Částice turbulentního proudění se pohybují neuspořádaně, malé poruchy v proudu díky neuspořádanosti rostou a způsobují promísení tekutiny [2], [21], [22].

K rozpoznání laminárního od turbulentního proudění (a naopak) se používá Reynoldsovo číslo (Re) – bezrozměrná veličina, která dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu. Turbulentní proudění je pro vysoké hodnoty Reynoldsova čísla, laminární pro nízké (v případě hodnoty Re blížící se k nekonečnu se jedná o potenciálové proudění) [2]:

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad [-], \quad (6)$$

kde U je rychlost proudění v trubici, d je průměr trubice a ν je kinematická viskozita [2].

6.1 Matematické modely turbulence

Matematické modely turbulence napomáhají k numerickým simulacím, jelikož v současnosti není možné vytvořit všeobecný model turbulence z důvodu náhodných pohybů částic turbulentního proudění [2].

Mezi základní matematické modely patří:

- Metoda přímé numerické simulace (DNS, Direct Numerical Simulation),
- Metoda velkých vírů (LES, Large Eddy Simulation) a
- Metody časového (Reynoldsova) středování (RANS, Reynolds Averaged Navier-Stokes) [21].

Metoda přímé numerické simulace (DNS) řeší Navier-Stokesovu rovnici s vysokou přesností, jelikož nemodeluje turbulenci. K výpočtu je nutná velmi jemná síť, velikost jednotlivých ok sítě je řádově stejná, jako velikost nejmenších vírů. DNS se používá jen pro výzkumné účely, jelikož počet buněk se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem prudce narůstá – čím vyšší je Reynoldsovo číslo, tím je výpočet (i časově) náročnější [21].

Metoda velkých vírů (LES) se při výpočtu zaměřuje jen na velké víry (jako prostorově a časově závislé útvary), proto je možné použít větší oka sítě a větší časový krok, než u metody DNS. Malé víry jsou odstraněny filtrací turbulentního pole. LES se zaměřuje na hybnost, hmotu a energii [21].

Metody časového středování (RANS) patří mezi nejpoužívanější, jelikož nejsou u velkých rozměrů a vysokého Reynoldsova čísla tak matematicky náročné, jako DNS a LES. Pro výpočet metodami RANS se používají zprůměrované hodnoty proudění a různé modely, například modely RANS typu k - ε , k - ω apod. uvažují turbulentní viskozitu, model RSM používá transportní rovnice pro šest složek Reynoldsových napětí [21].

7 Srovnávací studie Danilatos

Doktor Gerasimos D. Danilatos je známý svou průkopnickou prací týkající se environmentálních skenovacích mikroskopů, které se věnuje již od dob svého studia na Národní a Kapodistrické univerzitě v Athénách. Z Athén se přestěhoval do Austrálie, kde získal titul Ph.D. Je hlavním autorem více než šedesáti publikací v mezinárodních recenzovaných časopisech a získal deset patentů o různých aspektech ESEM [23].

Kromě mnoha dalších článků publikoval také v časopise Micron článek o nových etapách návrhu pro prostředí skenovacích elektronových mikroskopů, který se zabývá použitím velmi malých a tenkých tlak omezujících otvorů (PLA – pressure limiting apertures) ve vakuu. Důvodem malých a tenkých otvorů je snaha, aby svazek elektronů nemusel překonávat velký plynný proud, ale naopak co nejmenší a beze ztrát [24].

7.1 Principy studie PLA

Za normálních okolností není pro obecně uznávaný průměr PLA 0,5 mm snadné dosáhnout hraničních mezí vakua a zároveň rozumné velikosti čerpadla. Dr. Danilatos zkoumal co nejlepší využití takto relativně velkého PLA1 se zavedením alternativních principů a použití čerpadel tak, aby zobrazovaná hodnota byla co nejbližší nule a zároveň, aby bylo dosaženo minimální rychlosti úniku přes PLA2 [24].

V úvahu je brána osová symetrie proudů plynu podél osy elektronové optiky sloupce v ESEM, zejména v oblasti mezi PLA1 a PLA2. Pole proudění plynu je uzavřeno hranicemi povrchů pevných látek a plynných ploch na pevný tlak a teplotu. Výstupní ohraničení mezi dvěma clonami může způsobit chybu menší než 5%. Chybu je možné snížit nastavením ohraničení [24].

7.2 Geometrie PLA2

Pro chápání toku plynu je důležitá tvorba nadzvukového proudu – jakékoli poruchy ve směru proudu plynu (např. kolísání zpětného tlaku) nemohou být přenášeny proti proudění před zvukovou hladinu. Důsledkem mimo jiné je, že množství plynu unikající přes PLA1 je určeno pouze stagnačním tlakem proti proudu a objem úniku plynu přes PLA2 (prostřednictvím komplexní tvorby rázových vln) je ovlivněn [24].

Nejjednodušší geometrické uspořádání je PLA2 (na rovné ploše) v určité vzdálenosti od PLA1. Při změně vzdálenosti mezi PLA1 a PLA2 (ostatní parametry jsou konstantní) po krocích po 1 mm spolu s odsunem mezery e . Po dosažení $e = 1$ mm je umožněno zmenšení tloušťky držáku na tloušťku mřížky otvoru [24].

Plyn pronikající PLA2 se obvykle mění v opačném smyslu, než změna referenční hodnoty (nebo tloušťky částic) s výjimkou „hrbolu“, který je na obou křivkách. Při dostatečně krátké vzdálenosti kapacita čerpadla nezpůsobí velký rozdíl, jelikož účinek zpětného tlaku

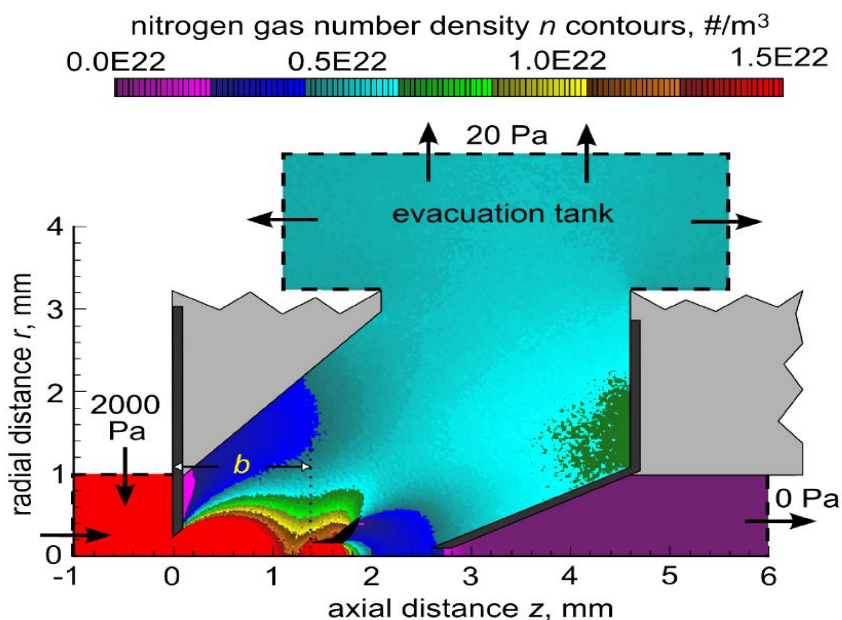
se s zmenšující-se vzdáleností mezi clonami snižuje. Silný proud plynu si tedy sám určuje výstup na tloušťce částic [24].

7.3 Diferenciální čerpání s pomocí ejektoru

V anglickém názvu pro diferenciální čerpání s pomocí ejektoru se používá zkratka EADP (Ejector Assisted Differential Pumping). Horní část PLA1 blízko kraje clony vytváří nízký bod (nízkou oblast) tlaku, což způsobuje tryska, která působí jako difúzní (odsávací) čerpadlo a unáší molekuly z přilehlé oblasti nízkého bodu tlaku. Přesměrováním proudění trysky s použitím přepážky je možné čerpací činnost proudu vytvořit pomocí oblasti s nízkou hustotou u vchodu PLA2 [24].

Doktor Danilatos experimentálně testoval nejrůznější přepážky a geometrie pro odklonění proudu PLA2. Dnes díky metodě DSMC (Direct Simulation Monte Carlo, v překladu Přímá simulace metody Monte Carlo²) je možné dosáhnout specifického aplikování principu proudového čerpadla tak, aby se napomohlo druhému stupni diferenciálního čerpání přes PLA2 [23], [24].

Na Obr. 13 je znázorněno pole proudění s kuželovým PLA2 v blízkosti optimální polohy a $\approx 2,6$ mm, včetně přepážky (deflektoru), která je zavedena s hrotem ve vzdálenosti $z \approx 1,4$ mm. Detailní geometrie přepážky je rozhodující pro prezentovaný výsledek a pouze nepatrná změna geometrie může způsobit velké rozdíly (tloušťky částic, únikové rychlosti přes PLA2) [24].



Obr. 13.: Optimální tokové pole s kuželovou geometrií a přepážkou (systém EAPD) [24].

² Metoda Monte Carlo je jednou z metod pro simulaci systémů [23].

8 Cíle práce

Cílem této práce bylo zaměření na oblast studie doktora Gerasima D. Danilata, která se zabývá přepážkou umístěnou v komoře diferenciálního čerpání environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu a jejím vlivem na charakter proudění. Celá zmíněná studie doktora Danilata se týká diferenciálního čerpacího systému s rychlouzávěrem se zaměřením na nové etapy návrhu pro ESEM [24].

Vliv změny vzdálenosti b (viz Obr. 13) a průměru přepážky byl vyhodnocován za pomoci programu Ansys Fluent. Byly vyhodnocovány parametry průměrného tlaku na dráze primárního svazku elektronů procházející diferenciálně čerpanou komorou, hmotnostní tok plynu procházející clonou PLA 2 směrem z diferenciálně čerpané komory do tubusu, rychlostní poměry v diferenciálně čerpané komoře a vliv na čerpání vlastní diferenciální komory. Vše s ohledem na pravděpodobnost rozptylu primárního svazku [24].

9 Zpracování výsledků

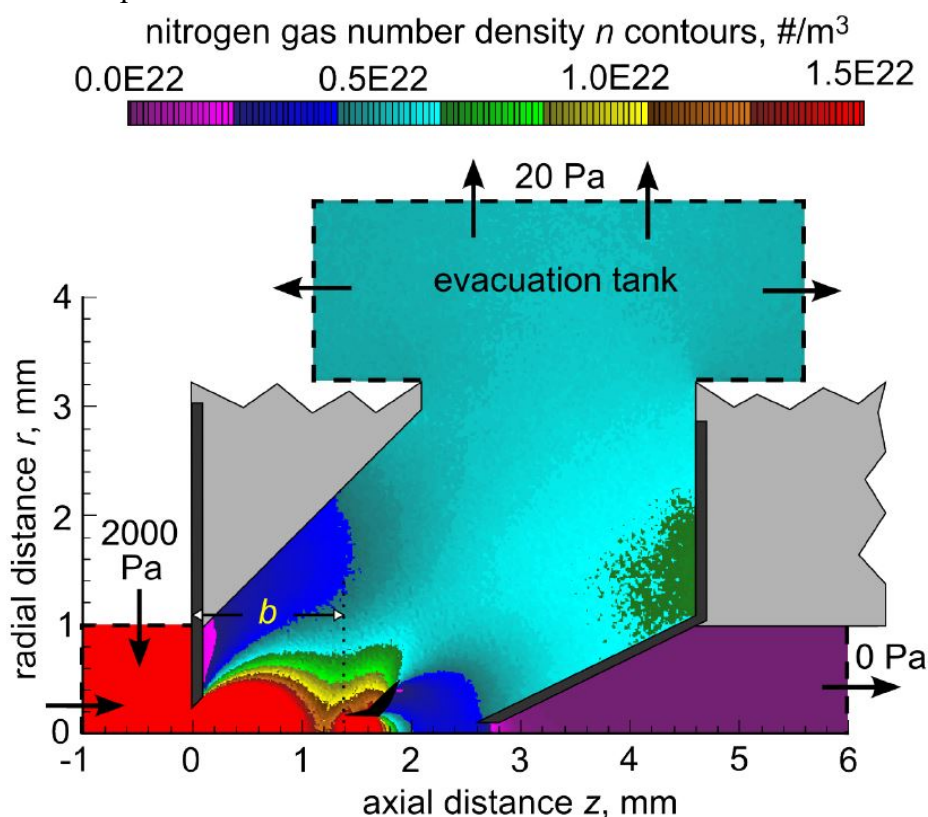
9.1 Srovnávací výpočet

Zpracování výsledků je postaveno na hodnotách týkajících se přepážky, které byly převzaty ze studie Dr. Danilata (znázorněno na Obr. 13). Prvním krokem bylo odladit systém Ansys Fluent tak, aby bylo dosaženo shodných hodnot pro okrajové podmínky, jako u výše zmíněné studie.

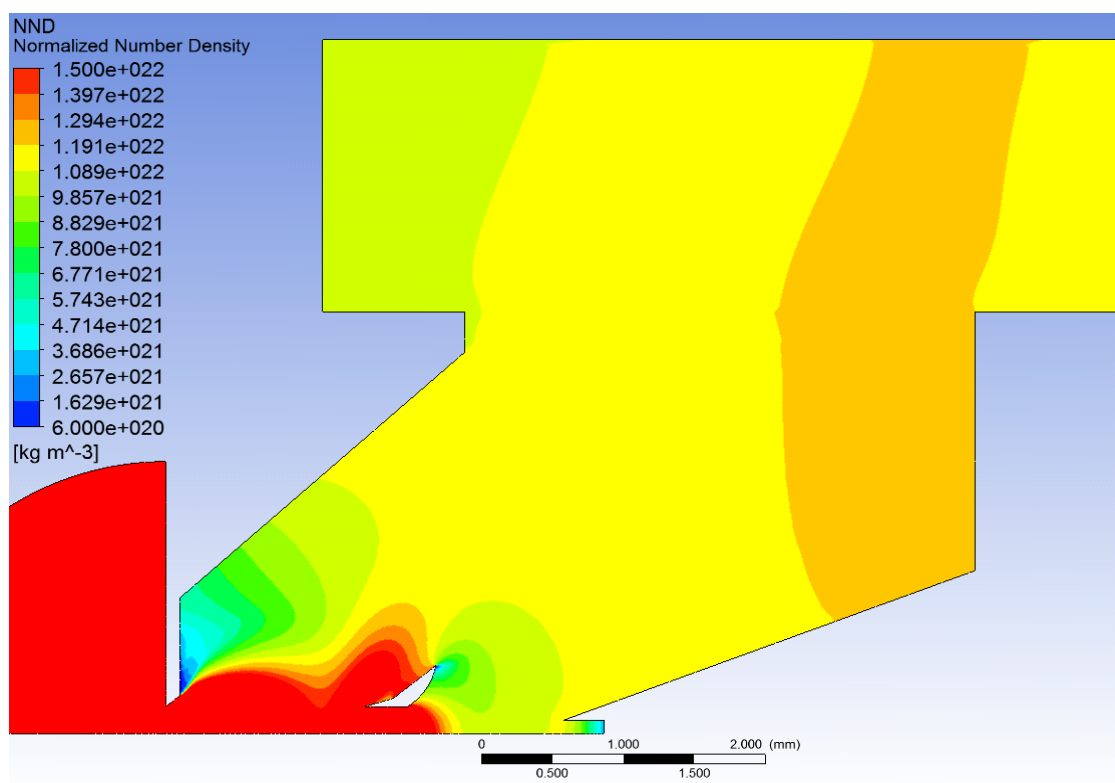
Okrajové podmínky a výchozí rozměry:

- tlak v komoře vzorku – 2000 Pa,
- tlak v prostoru odčerpávání – 20 Pa,
- tlak v tubusu – vysoké vakuum,
- $b = 14$ mm, průměr přepážky 0,4 mm a délka přepážky 0,6 mm [24].

Po nastavení okrajových podmínek a výchozích rozměrů byly získány výsledky charakterově shodné s mírným navýšením hodnot hustoty. Porovnání těchto výsledků je znázorněno na Obr. 14 a Obr. 15. Prvním z obrázků je znovu grafické znázornění rozložení hustoty Dr. Danilata, na druhém obrázku je simulace za použití stejných okrajových podmínek a výchozích rozměrů. Grafické rozložení hustoty plynu je shodné, pouze je použita jiná barevná škála stupnice.

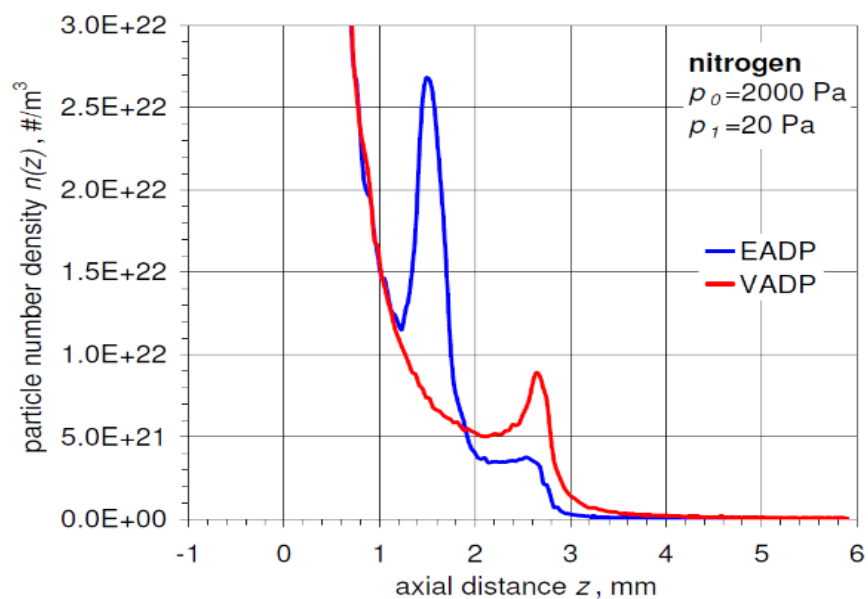


Obr. 14.: Výchozí grafické rozložení hustoty Dr. Danilata [24].

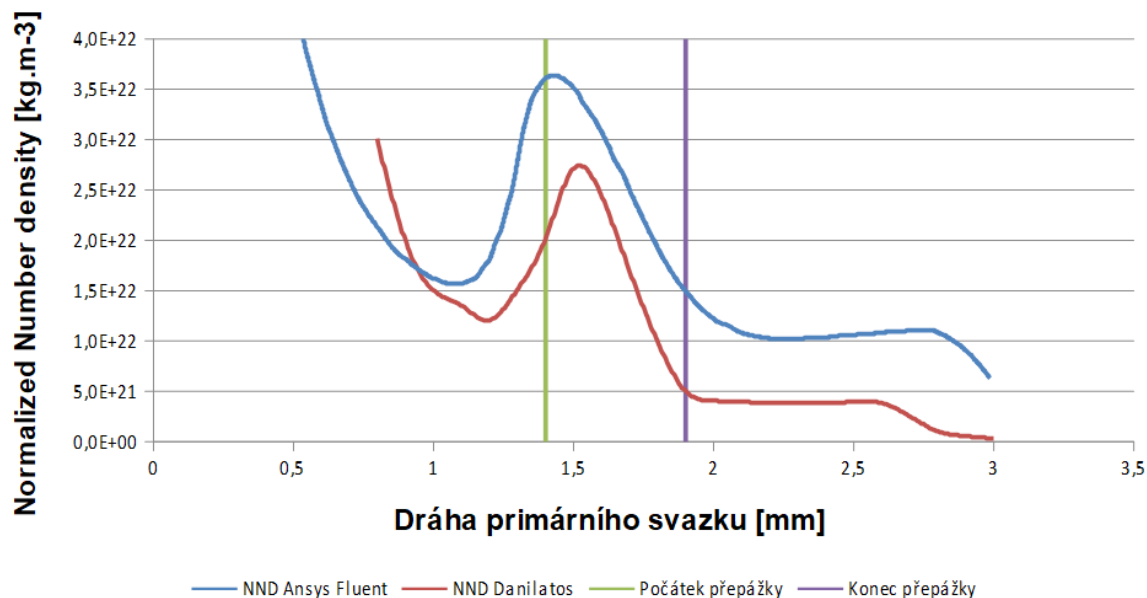


Obr. 15.: Grafické rozložení hustoty za použití stejných výchozích hodnot a rozměrů.

Průběh hustoty na dráze primárního svazku mezi clonou PLA1 a PLA2, který vyjádřil Dr. Danilatos je znázorněn na Obr. 16 a na Obr. 17 jsou pro porovnání uvedeny dráhy primárního svazku jak z předchozího obrázku, tak i po simulaci programu Ansys Fluent a pro znázornění také začátek a konec přepážky.



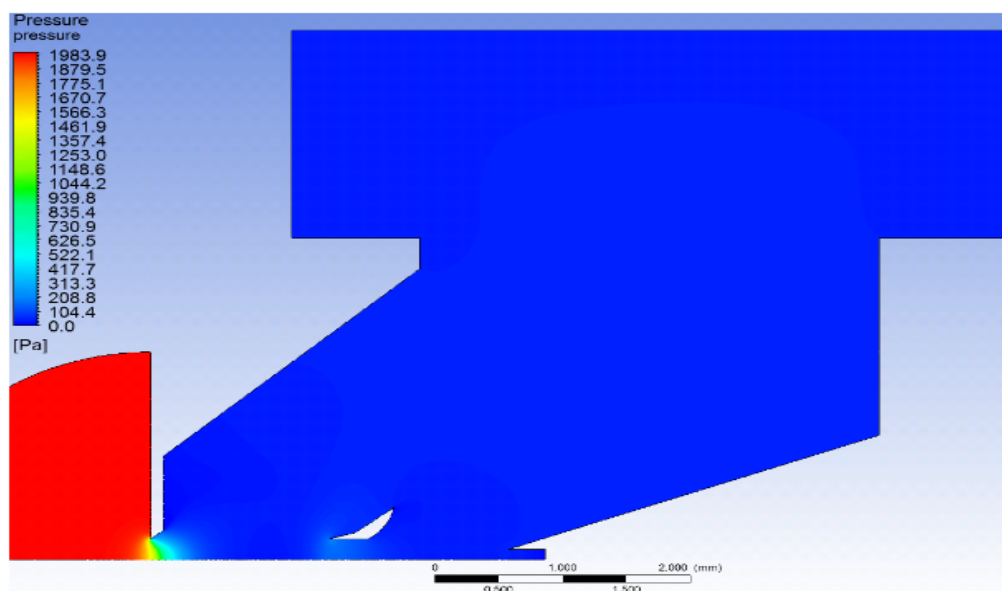
Obr. 16.: Průběh hustoty na dráze primárního svazku mezi PLA1 a PLA2 [24].



Obr. 17.: Porovnání průběhu hustot na dráhách primárního svazku.

Na následujících obrázcích je vyhodnoceno rozložení tlaku, obrázky se liší pouze rozsahem stupnic. Rozsah stupnic byl měněn pro získání optimálního přehledu o rozložení tlaku v nízkých hodnotách.

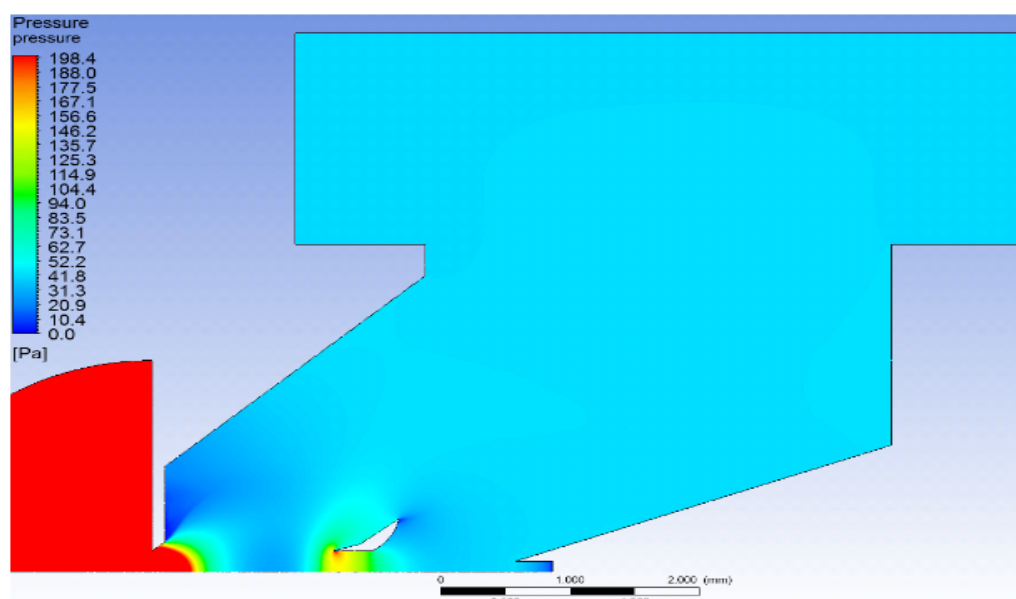
Na Obr. 18 je rozsah stupnic od minima do maxima a na první pohled je patrné, že je rozsah velice široký a nezobrazuje podrobnější rozložení tlaku v nízkých hodnotách.



Obr. 18.: Rozložení tlaku - rozsah od minima do maxima.

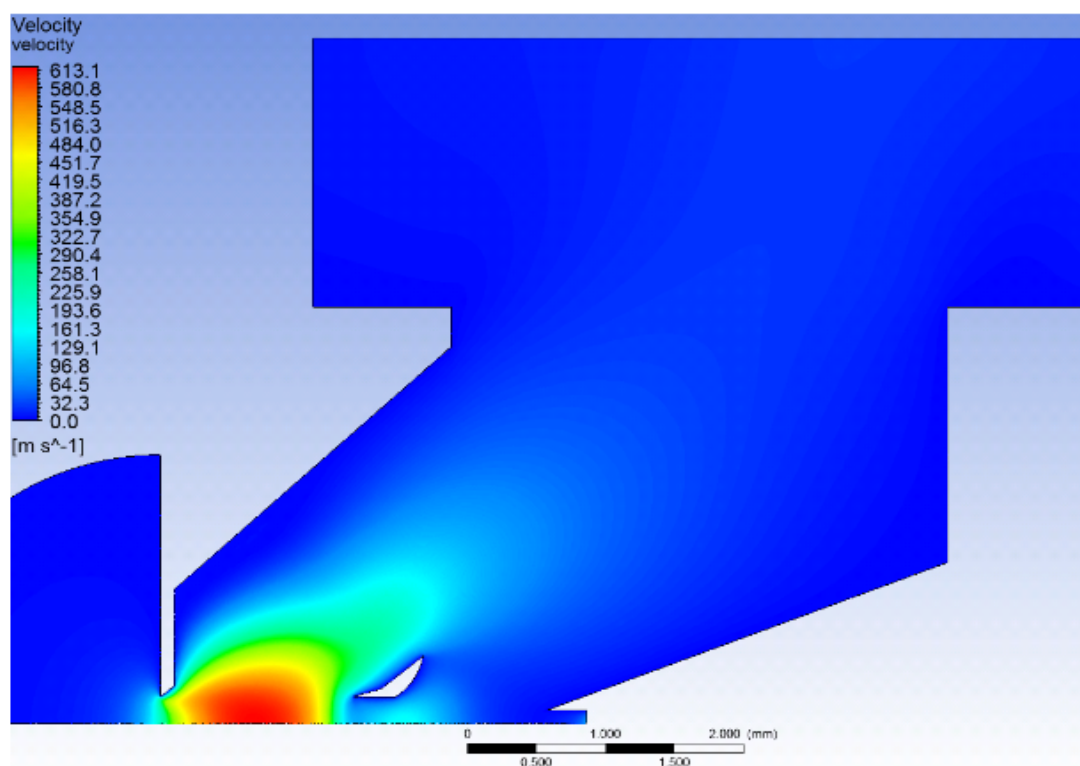
Po vymezení stupnice na rozsah od 0 do 200 Pa (znázorněno na Obr. 19) je již patrný nárůst tlaku na okraji přepážky v důsledku kritického proudění – přepážka zasahuje

do kritického proudění a na jejím hrotu dochází k poklesu rychlosti a tím i narůstání tlaku.

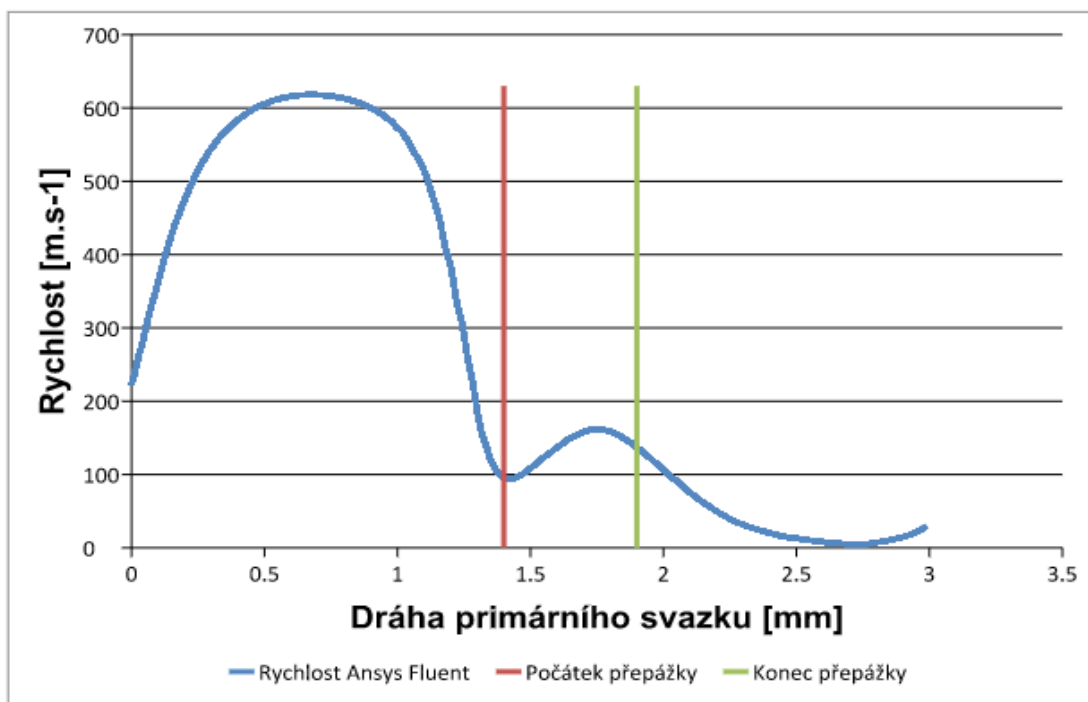


Obr. 19.: Rozložení tlaku - rozsah od 0 do 200 Pa.

Průběh rychlosti na hrotu přepážky je znázorněn na Obr. 20 a zároveň je patrný v grafickém znázornění (Obr. 21) dráhy primárního svazku na rychlosti.

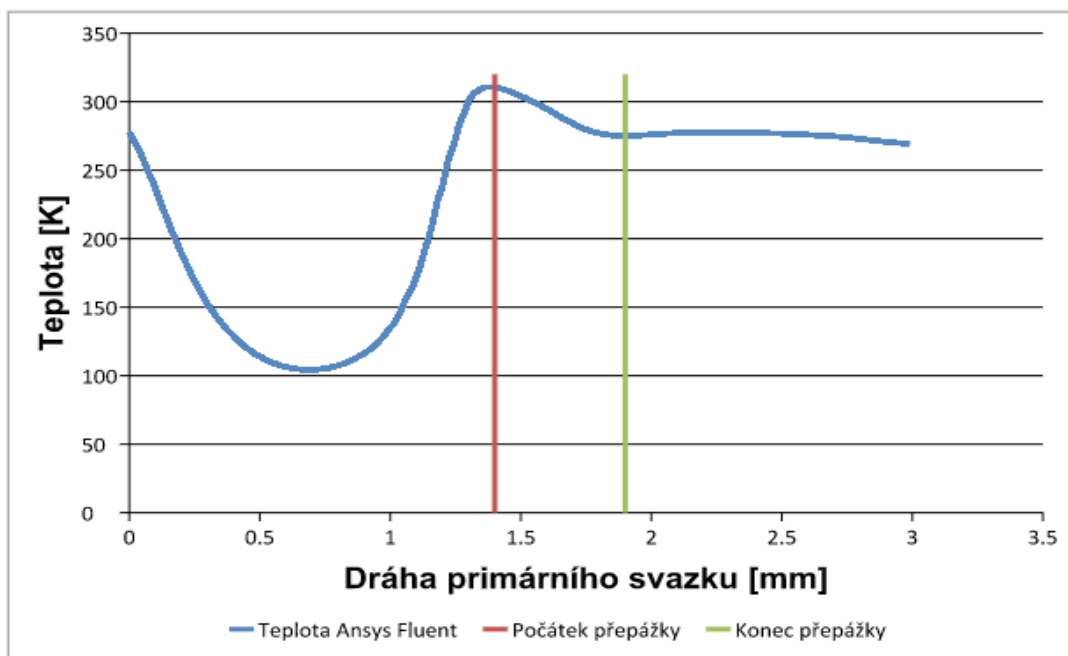


Obr. 20.: Průběh rychlosti proudění.



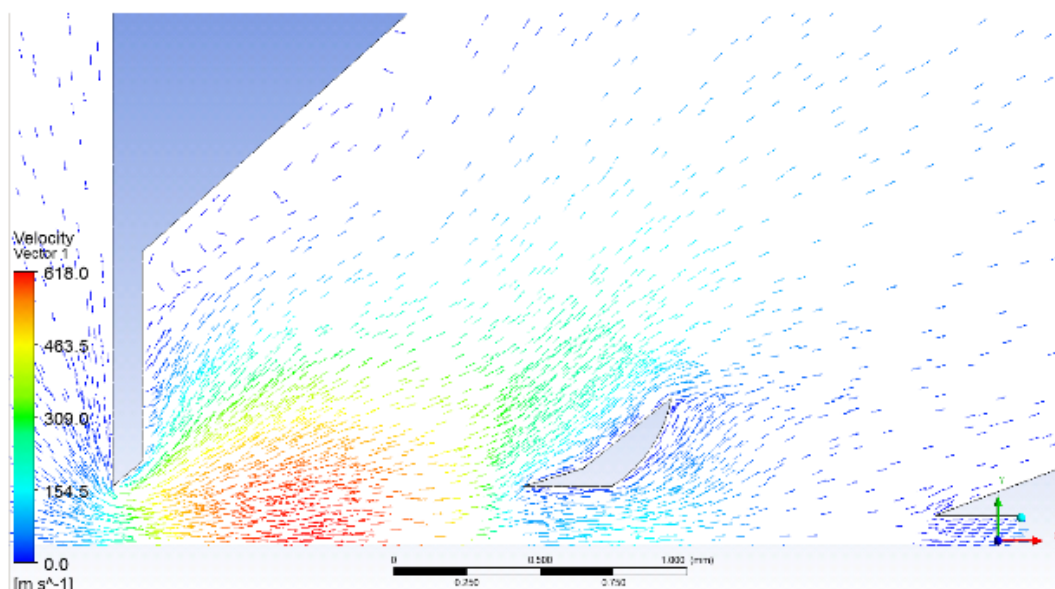
Obr. 21.: Grafické znázornění průběhu rychlosti proudění.

Charakter proudění kritické oblasti za clonou PLA1 je také popsán průběhem teploty graficky znázorněným na Obr. 22. Teplota se v oblasti kritického proudění vyznačuje výrazným poklesem.



Obr. 22.: Průběh teploty se zvýrazněnou oblastí umístění přepážky.

Poslední vypovídající hodnotou je rozložení vektoru rychlosti a směru proudění, které je uvedeno na Obr. 23.



Obr. 23.: Rozložení vektoru rychlosti a směru proudění.

9.2 Vyhodnocované varianty

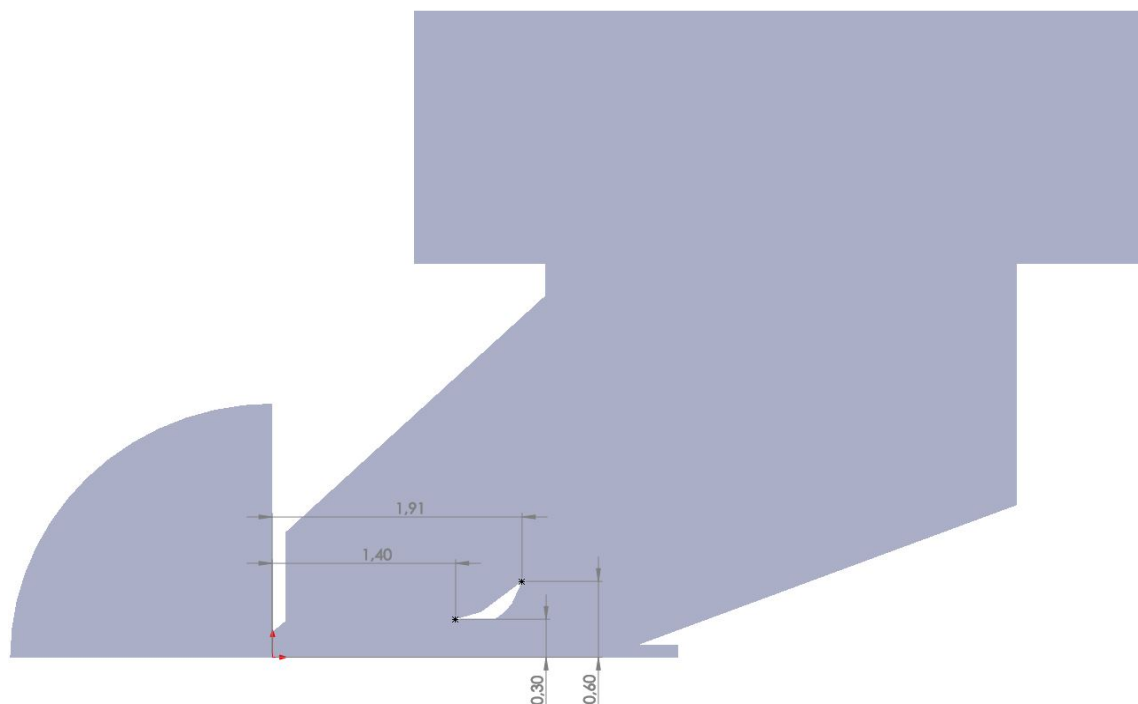
Po dokončení srovnávacího výpočtu dle Dr. Danilata byly měněny rozměry týkající se přepážky ve třech různých variantách:

- A. přepážka bez posunutí s větším průměrem,
- B. posunutá přepážka, původní průměr,
- C. posunutá přepážka s větším průměrem.

Ke každé z variant byly vyhodnoceny také průběhy rozložení hustoty, tlaku, rychlosti proudění a rozložení teploty včetně jejich průběhů vynesných do grafických závislostí s naznačeným počátkem a koncem přepážky. Tato vyhodnocení jsou vložena do příloh.

9.2.1 Varianta A – přepážka bez posunutí s větším průměrem

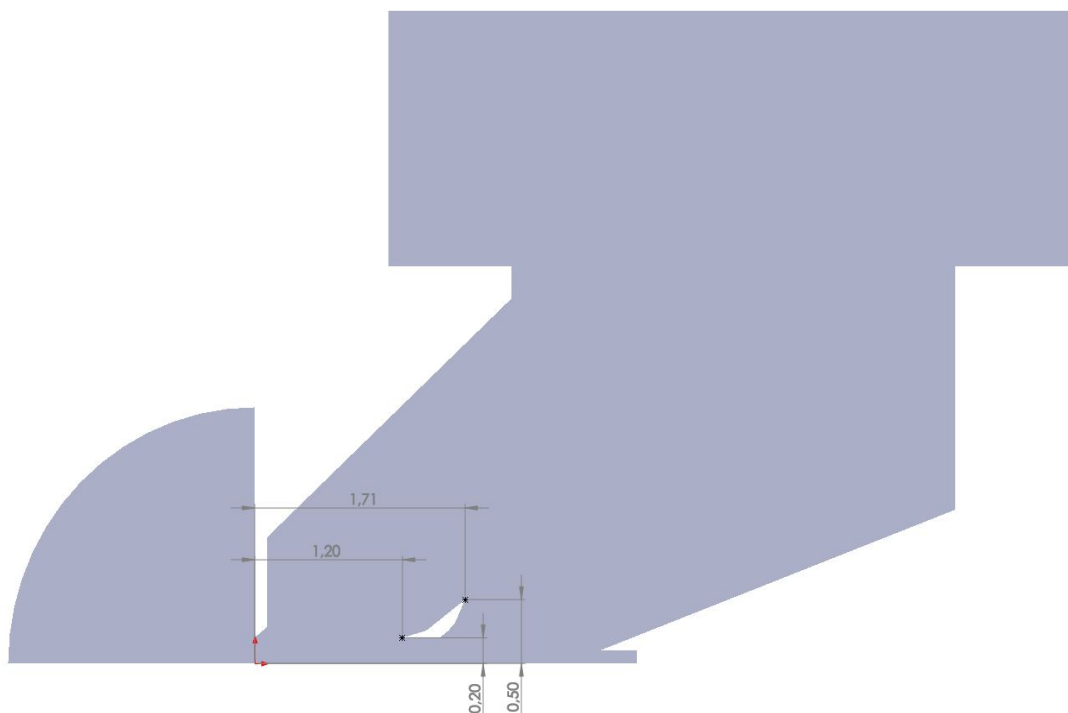
Výchozí poloha přepážky byla totožná se studií Dr. Danilata, avšak změnil se její průměr. Velikosti přepážky jsou uvedeny na Obr. 24.



Obr. 24.: Rozměry přepážky - varianta A, bez posunutí s větším průměrem.

9.2.2 Varianta B – posunutá přepážka, původní průměr

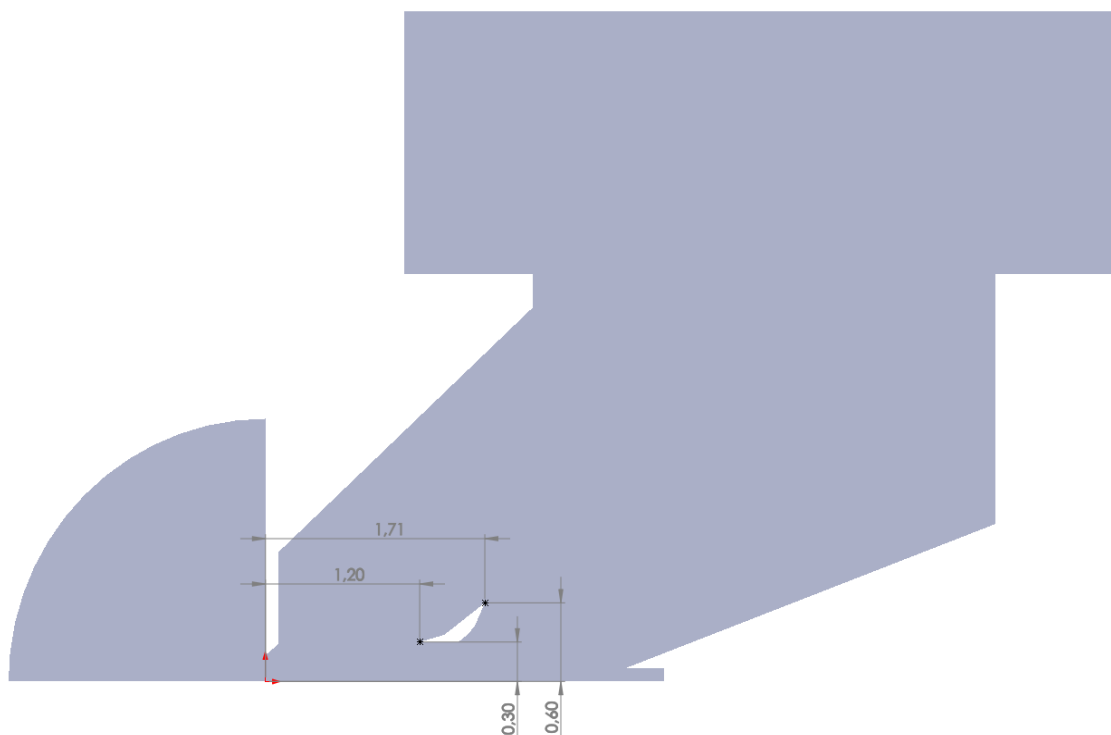
Ve druhé variantě došlo k posunutí přepážky, avšak průměr zůstal shodný s výchozí studií. Velikosti přepážky jsou uvedeny na Obr. 25.



Obr. 25.: Rozměry přepážky - varianta B, posunutá s původním průměrem.

9.2.3 Varianta C – posunutá přepážka, větší průměr

Ve třetí variantě byla přepážka posunuta a zároveň byl zvětšen průměr. Velikosti přepážky jsou uvedeny na Obr. 26.

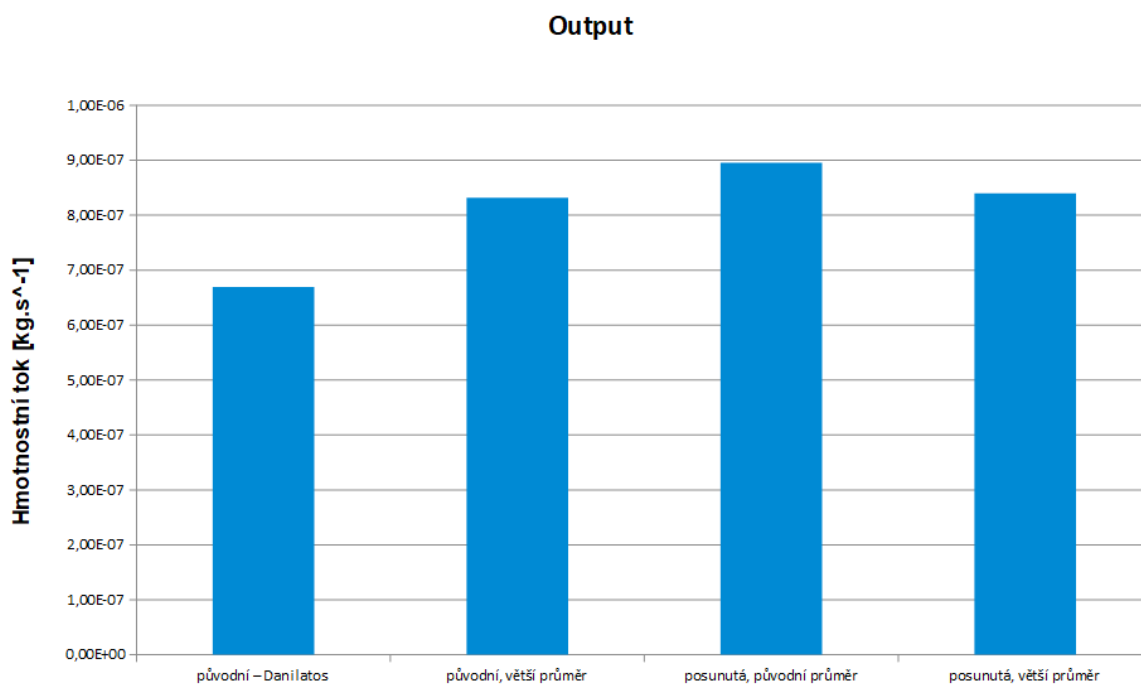


Obr. 26.: Rozměry přepážky - varianta C, posunutá s větším průměrem.

9.3 Vyhodnocení jednotlivých variant

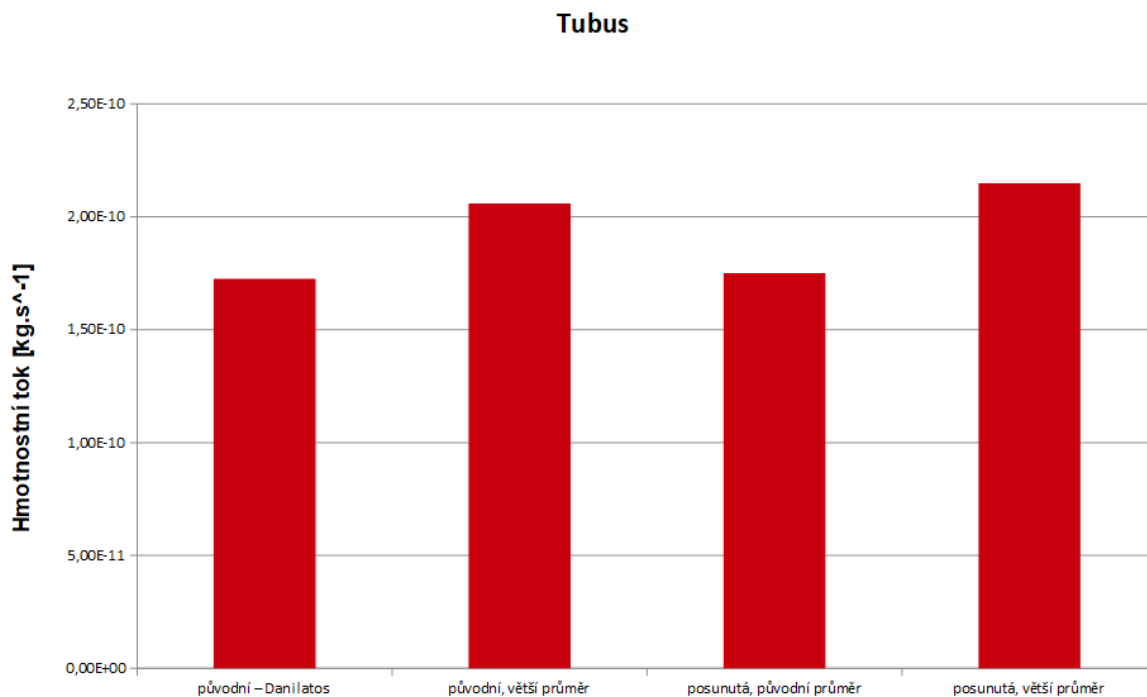
Vyhodnoceny byly čtyři sledované veličiny – Output, Tubus, Průměrné tlaky a Pravděpodobnost rozptylu.

Output – hmotnostní tok čerpání vlastní diferenciální komory. Charakterizuje kvalitu usměrnění čerpaného toku. Na rozptyl primárního svazku má sekundární vliv. Porovnání velikostních variant přepážky a jejich hmotnostních toků na výstupu je znázorněno na Obr. 27.



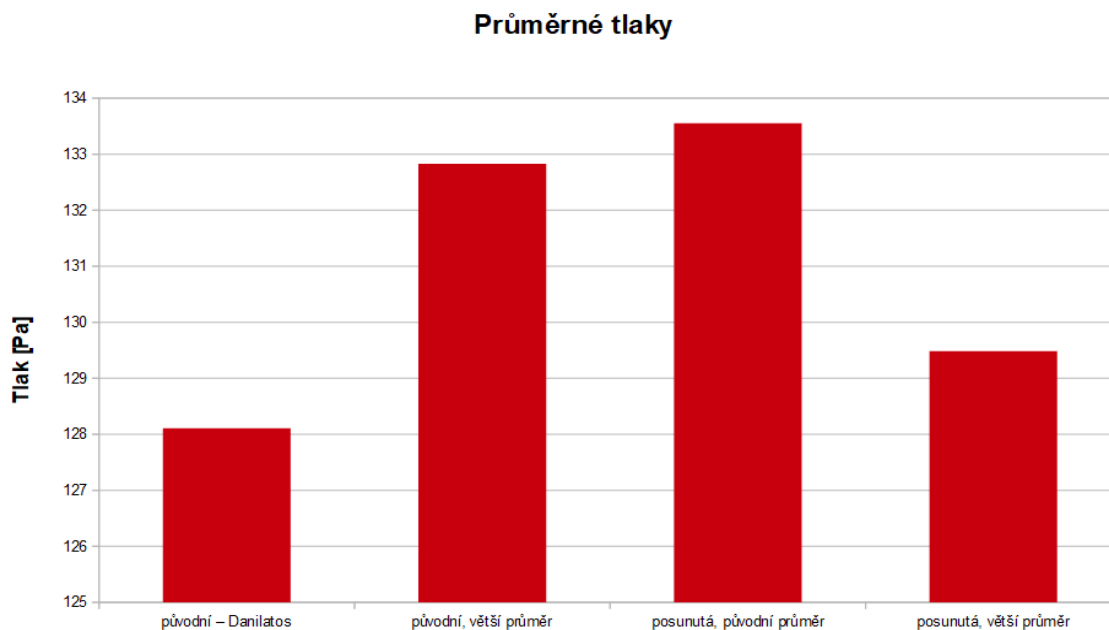
Obr. 27.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich hmotnostních toků na výstupu.

Tubus – hmotnostní tok charakterizující množství pronikajícího plynu clonou PLA 2 do tubusu. Má velký vliv na rozptyl primárního svazku ještě v tubusu nad clonou PLA 2. Porovnání jednotlivých variant hmotnostních toků v tubusu je uvedeno na Obr. 28.



Obr. 28.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich hmotnostních toků v tubusu.

Průměrné tlaky – průměrný tlak na dráze primárního svazku. Platí úměra, čím vyšší průměrný tlak, tím vyšší pravděpodobnost srážky prolétávajícího elektronu s molekulou plynu v diferenciálně čerpané komoře. Grafická závislost průměrných tlaků pro jednotlivé velikostní varianty přepážky je znázorněna na Obr. 29.

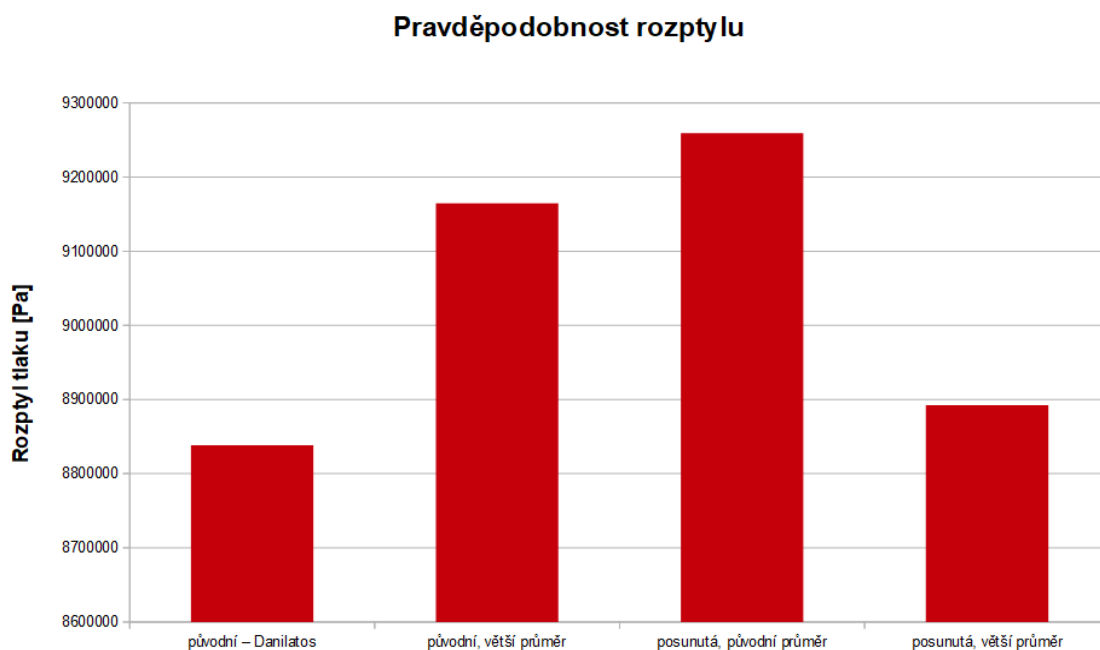


Obr. 29.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich průměrných tlaků.

Pravděpodobnost rozptylu – podle literatury je rozptyl elektronů úměrný součinu tlaku a vzdálenosti, kterou v tomto tlaku elektron proběhne. Vzhledem k výrazné počáteční závislosti tlaku $p(x)$ na vzdálenosti (souřadnice x) od PLA 1 by situaci nejlépe postihoval integrál:

$$Pd = \int_{0=PLA1}^d p(x) dx \quad . \quad (7)$$

Tato závislost je vyhodnocena na Obr. 30.



Obr. 30.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich pravděpodobností rozptylu.

Ze získaných výsledků vychází, že posun a změna průměru přepážky má výrazný vliv na tři základní veličiny ovlivňující rozptyl primárního svazku:

- průměrný tlak na dráze primárního svazku,
- závislost rozptylu na vlastní dráze,
- hmotnostní tok plynu procházející clonou PLA 2.

Z uvedených výsledků vychází nejlépe původní varianta, kde jsou všechny sledované veličiny nejnižší. Ke zvážení přichází posunutá varianta s větším průměrem, která průměrný tlak a rozptyl na dráze primárního svazku nemá hodnotově o mnoho větší, než původní varianta. Ale tím, že jde o clonku s větším průměrem, tak tato clonka představuje menší překážku prolétávajícím elektronům. Na škodu je, že větší průměr v přepážce způsobuje zhoršený ukazatel hmotnostního toku do clony PLA 2.

Závěr

Pro splnění úkolu bylo třeba nastudovat všeobecné informace týkající se mikroskopů, jejich rozdělení, vlastnosti elektronů a signály, které díky nim vznikají.

Poté byla práce zaměřena přímo na environmentální elektronový rastrovací mikroskop, kterého se týkala i výchozí studie. U této kapitoly jsou popsány základní části, které se týkají ESEM, jako je jeho vakuový systém s vakuovou soustavou a jeho jednotlivé součásti.

Další kapitola se týká počítačových programů Solid Works a Ansys Fluent použitých při řešení problému pro simulaci a výpočty.

Následují vyjádření základních rovnic pohybu tekutin, kterými jsou rovnice pohybu, kontinuity, Navier-Stokesovy rovnice a rovnice energie. Tyto rovnice jsou pro výpočty využívány i výše zmíněnými programy za využití výpočetní dynamiky tekutin.

Výpočetní dynamika tekutin zahrnuje také rozdělení fyzikálního modelu tělesa pomocí sítě na oblasti různých tvarů usnadňující výpočet. Zde jsou popsány i náhodné pohyby částic, rozdělené na laminární a turbulentní proudění včetně matematických modelů turbulencí.

Na závěr teoretické části práce je uvedena studie doktora Danilata, ze které jsou převzaty výchozí hodnoty a poté jsou s ní dosažené simulace porovnávány. U této studie je zaměřeno na základní informace o tlak omezujících clonách (PLA1 a PLA2) a principu diferenciálního čerpání pomocí ejektoru.

Po stanovení základních cílů práce (se zaměřením na vliv změny vzdálenosti, průměru a délky přepážky) se experimentální část věnuje zpracování výsledků, které jsou srovnávány s výchozí studií. Simulace pro porovnání jsou vytvořeny za použití programu Ansys Fluent, který pomocí barevné škály graficky znázorňuje simulace proudění.

Praktická část využívá základního nastavení převzatého z výchozí studie, postupně jsou měněny hodnoty týkající se přepážky, konkrétně její vzdálenost a délka. Pro jednotlivé změny hodnot jsou vyhodnoceny průběhy hustot na dráze primárního svazku s cílem získání optimálních podmínek pro průchod svazku diferenciálně čerpanou komorou.

Velikosti přepážky jsou měněny celkem ve třech různých variantách, pro které jsou vytvořeny grafické závislosti jednotlivých proudění hustot, tlaků, rychlostí a teplot včetně vynesení získaných závislostí do grafů s naznačenou umístěnou přepážkou. Aby byly jednotlivé varianty porovnatelné, jsou jejich průměrné hodnoty vyneseny do sloupcových grafů.

Výsledky v porovnání s výchozí studií ukazují, že se úspěšně podařilo odladit program Ansys Fluent pro daný případ se shodnými hodnotami a rozměry. Při porovnávání variant velikostí přepážky vychází nejlépe původní varianta Dr. Danilata, jelikož jsou všechny sledované veličiny nejnižší. Posunutá varianta s větším průměrem nemá oproti původní hodnotě průměrný tlak a rozptyl o mnoho vyšší, avšak větší průměr způsobuje zhoršený ukazatel hmotnostního toku do clony PLA 2.

Seznam použité literatury

- [1] HLAVATÁ, P. *Návrh tvaru diferenciálně čerpané komory pro EREM*. Brno, 2014. Klasické a španělské gymnázium. Vedoucí práce Mgr. Markéta Benešová, Ph.D.
- [2] BEDNÁŘ, E. *Analýza vlivu proudění plynu v oblasti umístění vzorku v komoře environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 112 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [3] FRANK, Luděk, Josef JIRÁK, Antonín REK a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. *Speciální diagnostika*. Brno. 79s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] JIRÁK, Josef, Svatopluk HAVLÍČEK a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. *Diagnostika a zkušebnictví*. Brno. 53s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] ŠUBRTOVÁ, Danuše. *Transmisní (prozařovací) elektronová mikroskopie* [online]. Hradec Králové, 2012 [cit. 2017-09-27]. Dostupné z: <https://www.lfhk.cuni.cz/Fakulta/Organizacni-struktura/Domaci-stranky/Ustav-histologie-a-embryologie/Vyzkum/Transmisni-elektronovy-mikroskop/Publikace-Transmisni-elektronova-mikroskopie.aspx/>. Univerzita Karlova v Praze.
- [6] FLEKNA, Martin. *Rastrovací elektronová mikroskopie vzorků zahřátých na zvýšenou teplotu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67584. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Stanislav Průša, Ph.D.
- [7] KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. *Elektronová mikroskopie* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2017-09-29]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>. Skriptum. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [8] BOUŠEK, Jaroslav, Petr KOSINA a Barbora MOJROVÁ. *Elektronické součástky*. Brno. 209s. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] DEAN, Thomas. *Structural and Functional Connectomics* [online]. [cit. 2017-09-30]. Dostupné z: <http://cs.brown.edu/people/tld/note/blog/14/10/16/index.html>.
- [10] ODEHNAL, Adam. *Scintilační detektor sekundárních elektronů pro environmentální rastrovací elektronový mikroskop* [online]. Brno, 2016 [cit. 2017-10-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59839>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.
- [11] NOVÁK, Pavel. *Scintilační a ionizační detektor sekundárních elektronů pro REM pracující při vyšším tlaku v komoře vzorku* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/2888>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.

- [12] BOUŠEK, Jaroslav. *Vakuová technika* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_29_SL_MVAF_Vakuova_technika.pdf. Učební text. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] *Informace o společnosti* [online]. Qaltham (Massachussets): Dassault Systèmes SolidWorks, 2017 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: <http://www.solidworks.cz/uvodni-stranka/menu-horni/informace-o-firme/>
- [14] SolidWorks – 3D CAD navrhování. *SolidVision, s.r.o.* [online]. Brno: SolidVision [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [15] ANSYS [online]. Canonsburg: ANSYS [cit. 2017-10-19]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/>
- [16] Fluids. HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fundamentals of Physics*. 9th ed. Cleveland: Wiley, 2010, s. 1136. ISBN 978-0470556535.
- [17] KLIMKO, Marek. *Mechanika tekutin I.* [online]. Plzeň [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~klimko/MT-podklady_cviceni.pdf. Západočeská univerzita v Plzni.
- [18] HABAJ, Elemír. *Studium proudění tekutin pomocí programu COMSOL Multiphysics* [online]. České Budějovice, 2008 [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: https://theses.cz/id/7hev22/downloadPraceContent_adipIdno_6479. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce RNDR. Petr Bartoš, Ph.D.
- [19] VODIČKA, Vít. *Přehled a vývoj CFD metod* [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38737. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Doupník.
- [20] JAHODA, M. *Počítačová dynamika tekutin* [online]. [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf
- [21] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění*. Praha. 21s. Skriptum. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní.
- [22] URUBA, Václav. *Turbulence*. Praha. 148s. Skriptum. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní.
- [23] DANILATOS, Gerasimos D. *ESEM Science and Technology* [online]. 2008 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <http://www.danilatos.com/>
- [24] DANILATOS, Gerasimos D. Velocity and ejector-jet-assisted differential pumping: Novel design stages for environmental SEM. *Micron: The International Research and Review Journal for Microscopy*. 2011, vol. 43, no. 5, p. 600-611. ISSN 09684328.

Seznam obrázků

Obr. 1.: První elektronový mikroskop a jeho autoři [9].....	8
Obr. 2.: Ukázka zobrazení předmětů pomocí SEM z měření autorky v laboratoři předmětu Diagnostika a zkušebnictví FEKT VUT v Brně: a) koroze měděné destičky, b) hrana tuhy.....	9
Obr. 3.: Katody elektronových mikroskopů [7].....	11
Obr. 4.: Signály vznikající při dopadu elektronového svazku na povrch pevné látky [3].....	12
Obr. 5.: Emise sekundárních elektronů u povrchu vzorku [2].....	12
Obr. 6.: Zjednodušené schéma vakuové soustavy ESEM. RV1, RV2, RV3 - rotační vývěvy; DV - difúzní vývěva; V1, V1', V2, V3, V4 - vakuové ventily; JV - jehlový ventil; C1, C2 - tlak omezující clony [11].....	15
Obr. 7.: Řez dvoustupňové rotační olejové vývěvy [2].....	16
Obr. 8.: Řez difúzní vývěvou [12].....	16
Obr. 9.: Diskretizace na konečný počet objemů [2].....	22
Obr. 10.: Výpočetní síť metody konečných objemů [20].....	23
Obr. 11.: Schéma iteračního cyklu [2].....	23
Obr. 12.: Rychlostní profily pro proudění v potrubí [2].....	24
Obr. 13.: Optimální tokové pole s kuželovou geometrií a přepážkou (systém EAPD) [24].....	27
Obr. 14.: Výchozí grafické rozložení hustoty Dr. Danilata [24].....	29
Obr. 15.: Grafické rozložení hustoty za použití stejných výchozích hodnot a rozměrů.....	30
Obr. 16.: Průběh hustoty na dráze primárního svazku mezi PLA1 a PLA2 [24].....	30
Obr. 17.: Porovnání průběhu hustot na dráhách primárního svazku.....	31
Obr. 18.: Rozložení tlaku - rozsah od minima do maxima.....	31
Obr. 19.: Rozložení tlaku - rozsah od 0 do 200 Pa.....	32
Obr. 20.: Průběh rychlosti proudění.....	32
Obr. 21.: Grafické znázornění průběhu rychlosti proudění.....	33
Obr. 22.: Průběh teploty se zvýrazněnou oblastí umístění přepážky.....	33
Obr. 23.: Rozložení vektoru rychlosti a směru proudění.....	34
Obr. 24.: Rozměry přepážky - varianta A, bez posunutí s větším průměrem.....	35
Obr. 25.: Rozměry přepážky - varianta B, posunutá s původním průměrem.....	36
Obr. 26.: Rozměry přepážky - varianta C, posunutá s větším průměrem.....	36
Obr. 27.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich hmostnostních toků na výstupu..	37
Obr. 28.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich hmostnostních toků v tubusu.....	38
Obr. 29.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich průměrných tlaků.....	38
Obr. 30.: Porovnání velikostních variant přepážky a jejich pravděpodobností rozptylu.....	39

Seznam použitých zkratek

2D	- Tvoudimenzionální, dvourozměrný
3D	- Trojdimenzionální, trojrozměrný
AE	- Augerovy elektrony
BSE	- Zpětně odražené elektrony
C1, C2	- Tlak omezující clony
CAD	- Computer Aided Design, Počítačem podporované projektování
CFD	- Computational Fluid Dynamics, Výpočetní dynamika kapalin
DNS	- Direct Numerical Simulation, Metoda přímé numerické simulace
DV	- Difúzní vývěva
DSMC	- Direct Simulation Monte Carlo, Přímá simulace metody Monte Carlo
EADP	- Ejector Assisted Differential Pumping, Diferenciální čerpání s pomocí ejektoru
ESEM	- Environmental Scanning Electron Microscopy, Environmentální rastrovací elektronový mikroskop
FEG	- Wolframová katoda
FVM	- Finite Volume Method, Metoda konečných objemů
JV	- Jehlový ventil
LES	- Large Eddy Simulation, Metoda velkých vírů
N-S	- Navier-Stokesova rovnice
Pa	- Pascal, jednotka tlaku
PLA	- Pressure limiting apertures, Tlak omezující otvory
RANS	- Reynolds Averaged Navier-Stokes, Metody časového (Reynoldsova) středování
Re	- Reynoldsovo číslo
ROV	- Rotační olejová vývěva
RTG	- Rentgenové záření
RV	- Rotační vývěva
SE	- Sekundární elektrony
SEM	- Scanning Electron Microscope, Rastrovací elektronový mikroskop
TEM	- Transmission Electron Microscope, Transmisní elektronový mikroskop

Seznam příloh

A	Přepážka bez posunutí, větší průměr.....	46
A.1	Rozložení hustoty (Normalized Number Density).....	46
A.2	Rozložení tlaku	47
A.3	Rozložení rychlosti proudění.....	48
A.4	Rozložení vektoru rychlosti a směru proudění.....	49
A.5	Rozložení teploty.....	50
B	Posunutá přepážka, původní průměr.....	51
B.1	Rozložení hustoty (Normalized Number Density).....	51
B.2	Rozložení tlaku.....	52
B.3	Rozložení rychlosti proudění.....	53
B.4	Rozložení vektoru rychlosti a směru proudění.....	54
B.5	Rozložení teploty.....	55
C	Posunutá přepážka, větší průměr.....	56
C.1	Rozložení hustoty (Normalized Number Density).....	56
C.2	Rozložení tlaku.....	57
C.3	Rozložení rychlosti proudění.....	58
C.4	Rozložení vektoru rychlosti a směru proudění.....	59
C.5	Rozložení teploty.....	60